

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale,
dell'Autoveicolo e della produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale**

Tesi di Laurea Magistrale

**Aircraft Health Management System:
Spare and supply Chain Management optimization**



Relatore

Prof. Paolo Maggiore

Candidato

Francesco Maria Custode 238527

Anno Accademico 2019/2020

Ringraziamenti

È mio dovere, prima di procedere con la trattazione di questo elaborato, dedicare un piccolo seppur importante spazio alle persone che hanno contribuito in maniera tangibile, con il loro instancabile supporto, alla realizzazione dello stesso.

Un sentito grazie va al mio relatore Prof. Paolo Maggiore per le conoscenze trasmesse durante tutto il percorso di studio e in particolare per avermi guidato, con suggerimenti pratici, verso la stesura di tale elaborato.

Ringrazio anche l'Ing. Francesco Paglialonga della azienda Teoresi SPA che mi ha dato la possibilità di poter realizzare questa tesi e la fortuna di collaborare con l'azienda cliente Leonardo-Sezione velivoli. In modo particolare ringrazio l'Ing. Francesco Grosso che mi ha offerto l'opportunità di cooperare con persone altamente qualificate come l'Ing. Alberto Carestiato e l'Ing. Luca Martorano che mi hanno guidato passo dopo passo lungo questo iter di stesura, senza dei quali non ce l'avrei mai fatta.

Senza il supporto morale e i sacrifici dei miei cari, non sarei potuto arrivare fin qui. Grazie per esserci sempre stati soprattutto nei momenti di sconforto.

Infine, dedico questa tesi a me stesso, ai miei sacrifici e alla mia tenacia che mi hanno permesso di arrivare fin qui.

Sommario

1	INTRODUZIONE	1
2	LOGISTICA	2
2.1	<i>Dalla logistica di Supporto al Supporto Logistico Integrato</i>	<i>2</i>
2.2	<i>Ingegneria logistica</i>	<i>2</i>
2.3	<i>Filosofia della manutenzione.....</i>	<i>3</i>
2.4	<i>Strumenti della logistica.....</i>	<i>4</i>
2.4.1	<i>Analisi del costo del ciclo di vita LCCA.....</i>	<i>4</i>
3	MANUTENZIONE.....	6
3.1	<i>Problematiche della manutenzione.....</i>	<i>6</i>
3.2	<i>Livelli di Manutenzione.....</i>	<i>6</i>
3.3	<i>ILS nella fase di progetto</i>	<i>7</i>
3.3.1	<i>Analisi e previsioni di manutenibilità</i>	<i>7</i>
3.4	<i>Filosofia e politica di manutenzione</i>	<i>8</i>
3.4.1	<i>Avarie</i>	<i>8</i>
3.4.2	<i>Affidabilità in manutenzione</i>	<i>8</i>
3.5	<i>Concetti base sulla manutenibilità</i>	<i>10</i>
3.5.1	<i>Manutenibilità e disponibilità</i>	<i>10</i>
3.5.2	<i>MTTR e sua influenza sulla Disponibilità</i>	<i>11</i>
3.6	<i>Dinamica della filosofia di manutenzione</i>	<i>12</i>
3.6.1	<i>Hard time (H.T.).....</i>	<i>12</i>
3.6.2	<i>On Condition (OC)</i>	<i>12</i>
3.6.3	<i>Condition Monitoring (CM)</i>	<i>13</i>
3.7	<i>Analisi MSG3 (Maintenance Steering Group 3).....</i>	<i>13</i>
3.7.1	<i>Livelli diagramma logico</i>	<i>14</i>
3.8	<i>RCM</i>	<i>16</i>
3.8.1	<i>Tecniche di Condition-Monitoring</i>	<i>16</i>
3.8.2	<i>Implementazione RCM</i>	<i>17</i>
3.8.3	<i>Costo della manutenzione.....</i>	<i>18</i>
4	APPROVVIGIONAMENTO	19
4.1	<i>Introduzione</i>	<i>19</i>
4.1.1	<i>Classificazione Ricambi.....</i>	<i>19</i>
4.1.2	<i>Parametri fondamentali</i>	<i>19</i>
4.2	<i>Approvvigionamento iniziale.....</i>	<i>20</i>
4.3	<i>Gestione parti di ricambio</i>	<i>21</i>

4.4	<i>La gamma di magazzino</i>	21
4.4.1	Tipi di Ricambi	21
4.4.2	Miglioramento della Gamma di Magazzino	22
4.5	<i>La gestione dello Stock</i>	22
4.5.1	Punto di Riordino	23
4.5.2	Scorta minima	23
4.5.3	Modellazione matematica	24
5	<i>LIFE CYCLE COST ANALYSIS</i>	27
5.1	<i>Modello di tipo Ingegneristico</i>	27
5.1.1	LCC come Strumento di Decisione	27
5.1.2	Modello di Calcolo	28
5.1.3	Considerazioni sul Modello	29
5.2	<i>Programma di Affidabilità e Manutenibilità per la riduzione dei costi di manutenzione</i>	29
5.2.1	Prima Fase: Definizione dei Concetti e degli obiettivi	30
5.2.2	Seconda fase: controllo del progetto	30
5.2.3	Terza Fase: Verifica Sperimentale	31
5.2.4	Quarta Fase: Monitoring dei Velivoli in Servizio	32
5.3	<i>In-Service Data Analysis (ISDA)</i>	32
5.3.1	Generalità	32
5.4	<i>Failure Reporting Analysis & Corrective Action System (FRACAS)</i>	34
5.4.1	Generalità	34
5.4.2	Tipologie di processo FRACAS e pianificazione	35
6	<i>MANUTENZIONE PREDITTIVA</i>	36
6.1	<i>Definizione Prognostica</i>	36
6.2	<i>Linee evolutive</i>	37
6.3	<i>Diagnostica vs Prognostica</i>	39
6.3.1	Telemetria	39
6.3.2	Predizioni	39
6.4	<i>Le tecnologie per la manutenzione su condizione</i>	40
6.4.1	Gli sviluppi nel Condition Monitoring	40
6.5	<i>Testabilità e Prognostica</i>	41
6.5.1	La gestione della Testabilità	42
6.5.2	La gestione della Prognostica	42
6.6	<i>L'implementazione della Prognostica</i>	43
6.6.1	Il processo di progettazione della Prognostica	43
6.6.2	Sistemi Intelligenti	44

6.7	<i>Tecniche innovative per la valutazione dell'affidabilità dei sistemi complessi</i>	46
6.7.1	Tele manutenzione	47
6.8	<i>Benefici della prognostica sul supporto logistico</i>	47
7	CASO DI STUDIO	51
7.1	Generalità	51
7.2	Nickel Cadmium Batterie	51
7.2.1	Tipi di Batterie Ni/Cd	51
7.2.2	Reazioni carica/scarica	53
7.3	Caratteristiche di scarica, Effetto memoria and Self-Discharge	54
7.3.1	Tecniche di ricarica	56
7.3.2	Cycle Life	57
7.4	Batterie sul velivolo	57
7.4.1	Batteria Principale	57
7.5	Definizione Ambiente Aircraft	58
7.5.1	Generalità	58
7.6	Tecnologie attuali	59
7.6.1	Carica On board	59
7.6.2	Duty cycle	60
7.6.3	Vita della batteria	60
7.7	Future Trends	60
7.8	Batteria del caso di studio	61
7.8.1	Configurazione batteria	61
7.8.2	Temperature di utilizzo	62
7.8.3	Metodi di Carica	62
7.8.4	Manutenzione	62
8	MODELLO BATTERIA	64
8.1	Generalità	64
8.1.1	Previsione prestazioni	64
8.2	Analisi predittiva	65
8.3	Filtro di Kalman	65
8.3.1	Introduzione al problema	66
8.4	Filtri non lineari sub-ottimali	69
8.4.1	Unscented Kalman filter	69
8.4.2	Equazioni di filtraggio	70
8.4.3	The Unscented Transform	71
8.5	Modellazione in Simulink e Simscape	72

9	ANALISI DATI	83
9.1	Generalità.....	83
9.2	Life cycle cost Analysis Scenario Reale	87
9.2.1	Eventi di Overhaul e manutenzione correttiva	87
9.2.2	Calcolo degli MTBUR In-Service	87
9.2.3	Spare parts, Riparazioni, Overhaul e attività manutentiva	88
9.2.4	Conclusioni scenario Real.....	92
9.3	Life Cycle Cost Scenario Innovativo	93
9.4	Analisi costi Manutenzione	101
10	CONCLUSIONI	106
11	BIBLIOGRAFIA.....	110

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Step metodo LCCA	5
Figura 2 Costi vita operativa.....	5
Figura 3 Curva distribuzione vasca da bagno.....	9
Figura 4 Affidabilità logistica.....	10
Figura 5 Esempio Condition Monitoring	13
Figura 6 Flowchart MSG-3.....	14
Figura 7 Condion Monitoring: Potential Failure Detection.....	17
Figura 8 Step RCM	17
Figura 9 Costi manutenzione RCM	18
Figura 10 Flowchart modello ingegneristico	28
Figura 11 Fasi LCCA	29
Figura 12 Flowchart fasi LCCA	32
Figura 13 Flowchart ISDA	33
Figura 14 Flowchart FRACAS	35
Figura 15 Flowchart Diagnostica Predittiva	36
Figura 16 Pocket Plate Ni-Cd	51
Figura 17 Sintered plate Ni-Cd.....	52
Figura 18 FNC Ni-Cd.....	52
Figura 19 Reazione carica/scarica	54
Figura 20 Variazione tensione a diversi ratei di scarica	55
Figura 21 Effetto memoria	55
Figura 22 Metodi di Carica	56
Figura 23 Cycle Life.....	57
Figura 24 Batteria SAFT P/N 407CH5	61
Figura 25 FlowChart Overhaul.....	63
Figura 26 Circuito equivalente.....	72
Figura 27 Circuito equivalente in Simscape	73
Figura 28 Blocco Degrading Battery.....	73
Figura 29 Blocco Cycled based degradation capacity.....	74
Figura 30 Modello Simulink completo	74
Figura 31 Grafici in output con Degradazione=1 Ah.....	75
Figura 32 Grafici output modello modificato con Degradazione=0.023 Ah	76
Figura 33 Valori limiti di degradazione.....	77
Figura 34 Flowchart generazione grafici mutipli Matlab	78
Figura 35 Simulazione completa Fleet 2.....	79
Figura 36 Entrata in servizio dei velivoli	85
Figura 37 Cumulative Repair Costs.....	90
Figura 38 Cumulative Overhaul Costs.....	91
Figura 39 Maintenance Personnell Overhaul Check Cumulative Costs	91
Figura 40 Cumulative UR Removal/Installation & Test Costs.....	92
Figura 41 Costi Totali per flotta (Scenario Reale).....	92
Figura 42 Grafici simulazione Flotta 3 per singolo velivolo	97
Figura 43 Grafico simulazione intera Flotta 3	98
Figura 44 Grafici rimozioni Flotta 1	99
Figura 45 Grafici rimozioni Flotta 2	99
Figura 46 Grafici rimozioni Flotta 3	100
Figura 47 Cumulative Repair costs	104
Figura 48 Cumulative removal/installation costs.....	105

<i>Figura 49 Costi totali (Scenario Innovativo)</i>	105
<i>Figura 50 Confronto costi singola sezione (Predictive vs Preventive)</i>	106
<i>Figura 51 Confronto costi totali (Predictive vs Preventive)</i>	107
<i>Figura 52 Confronto CPFH (Predictive vs Preventive)</i>	107
<i>Figura 53 Flowchart AHMS</i>	108

1 INTRODUZIONE

Il seguente elaborato si pone l'obiettivo di evidenziare gli stretti legami che intercorrono tra il progetto di un Prodotto Aeronautico e lo sviluppo del Supporto Logistico. In particolare, si vogliono evidenziare i vantaggi e la complessità, relativi ad un Caso di Studio specifico, del passaggio da Manutenzione Preventiva a Manutenzione Predittiva.

Saranno illustrati innanzi tutto i due differenti approcci alla manutenzione, lo *"State of art"* della Manutenzione Preventiva e il *"Future trend"* della Manutenzione Predittiva e quindi i pro e i contro che tale nuova metodologia di manutenzione propone.

Il Caso di Studio è relativo ad una batteria Ni-Cd utilizzata a bordo di un velivolo da trasporto militare multiruolo, bimotores turboelica proposto dall'azienda **Teoresi SPA** in collaborazione con il Cliente, **Leonardo - Divisione Velivoli "Ente di Logistic Engineering-Logistic Support Verification & Improvements (ISDA & FRACAS)"**. Saranno presentati:

- un modello semplificato della batteria, sviluppato in Simulink e Simscape
- uno scenario realistico di velivoli in servizio, che prevede rimozioni schedate e correttive della batteria
- uno scenario simulato, in cui si utilizza il modello Simulink per ricreare le rimozioni dello scenario reale, ipotizzando però di fornire ai manutentori degli avvisi relativi al Trend di Degrado della batteria
- un'analisi Life Cycle Cost di entrambi gli scenari e un confronto che metta in evidenza le differenze e i possibili benefici dell'approccio Predittivo.

Lo scenario simulato, vuole rappresentare, limitatamente al Caso di Studio, un sistema innovativo, per la categoria del velivolo, di Aircraft Health Management System, che possa un domani permettere di supportare e ottimizzare l'approvvigionamento di ricambi (Spare) e la catena logistica (Supply Chain).

2 LOGISTICA

Il termine logistica può assumere diverse connotazioni in funzione del prodotto a cui essa fa riferimento. Ad esempio per logistica militare si intende la gestione degli uomini, dei mezzi, dei materiali e dei servizi di supporto necessari per portare a compimento una particolare missione. Per logistica di supporto si intende l'insieme di attività di supporto fornite dal produttore all'utilizzatore del prodotto.

2.1 Dalla logistica di Supporto al Supporto Logistico Integrato

Per i prodotti più semplici, per esempio di tipo elettronico, il produttore può limitarsi ad assicurare al mercato la disponibilità dei ricambi delegando il compito della riparazione ad officine esistenti. Ciò è possibile quando la semplicità del prodotto permette una facile manutenzione che possa essere effettuata anche da personale tecnico di livello modesto. Per prodotti più sofisticati la funzione logistica di supporto viene svolta dal servizio di assistenza tecnica. Le principali problematiche sono essenzialmente relative alle disponibilità di ricambi e personale.

Oggigiorno grazie al progresso tecnologico e al costante aumento della dimensione e complessità dei prodotti tale servizio di assistenza è obsoleto. La funzione logistica di supporto ha subito infatti, da alcuni anni a questa parte, una sostanziale rivalutazione. Quando si tratta di prodotti o sistemi di una elevata complessità caratterizzati da numerose parti e sottoinsiemi, la logistica di supporto implica un insieme di attività che vanno ben oltre la sola gestione dei ricambi e dei manutentori. A fronte di ogni sistema da supportare è necessario dunque disporre di un vero e proprio sistema di supporto costituito da un insieme di materiali, servizi e personale. Si parla allora di sistema di **Supporto Logistico Integrato** (ILS), dove il termine integrato sta ad indicare che le componenti di tale sistema, essendo fortemente interdipendenti devono essere progettate, sin dalle prime fasi del progetto, con criteri di tipo sistemistico.

In sintesi il ruolo del logistico, limitato inizialmente alla sola fase di utilizzo del prodotto, è passato ad interessare anche la fase di produzione durante la quale si deve predisporre la realizzazione del sistema ILS, sino ad estendersi alla fase di progetto durante la quale egli deve orientare l'impostazione del sistema primario e controllarne l'evoluzione, verificando che il sistema sviluppato possa essere facilmente sostenuto a livello economico in tutto il periodo di utilizzo.

"TANTO PRIMA, TANTO MEGLIO!" (fare prima, pensando al dopo).

2.2 Ingegneria logistica

Ingegneria logistica può essere definita come la branca della logistica che studia le tematiche del supporto al prodotto in maniera scientifica e metodologica, con particolare riguardo alla interazione ed integrazione tra sistema primario e sistema di supporto.

Essa può comprendere diverse discipline, tra cui:

- **Gestione della configurazione:** disciplina che indirizza e sovrintende (a livello tecnico ed amministrativo) all'individuazione ed alla documentazione delle caratteristiche funzionali e fisiche di ogni elemento della configurazione del prodotto, al controllo delle modifiche a tali caratteristiche, alla registrazione ed alla stesura di rapporti sulle modifiche di stato e dell'implementazione e alla verifica della conformità rispetto a requisiti determinati.

- **Gestione Pubblicazioni Tecniche:** insieme delle documentazioni di supporto operativo e manutentivo finalizzate a fornire direttive, istruzioni ed informazioni tecniche necessarie per l'impiego, la manutenzione, la riparazione, la revisione, l'alienazione e la conservazione di un prodotto fornito al Cliente
- **Materiel Support:** ha come obiettivo il mantenimento delle prestazioni richieste al Prodotto nel ciclo di vita in servizio e allo scopo assicura le informazioni e la documentazione utili all'organizzazione e gestione del processo di approvvigionamento, distribuzione e controllo del livello delle scorte logistiche e del ciclo di riparazione-revisione degli equipaggiamenti, considerando il rischio di non conformità, di indisponibilità ("low stock") o di immobilizzo di capitale per giacenza ("over stock").
- **Analisi Dati In Servizio (ISDA) e Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System (FRACAS):** scopo dell'ISDA è misurare le performance operative e affidabilistiche dei Prodotti in servizio, confrontandole con i valori contrattuali/di specifica. Il processo FRACAS raccoglie ed organizza i dati delle failures, identifica le cause delle avarie, ricerca eventuali guasti ricorrenti (Pattern Defects) per definire le relative azioni correttive volte al miglioramento dell'affidabilità e disponibilità del Prodotto.
- **Modellizzazione di sistemi di supporto logistico e analisi di Life Cycle Cost (LCCA):** la modellizzazione è responsabile della definizione, pianificazione e raccomandazione al Cliente dell'assortimento qualitativo e quantitativo dei materiali di supporto e ricambi necessari al mantenimento del Prodotto in esercizio, in funzione del requisito di disponibilità operativa, o di disponibilità dei materiali a magazzino, concordato con il Cliente. La Life Cycle Cost Analysis viene utilizzata in tutte le fasi di progetto e in modo continuo ed iterativo come strumento di management per aiutare la valutazione e la scelta di una migliore soluzione tra le possibili che si presentano nel processo progettuale.

In particolare, l'analisi LCC permette di valutare la validità relativa di più soluzioni alternative ad un dato problema usando come parametro fondamentale il Life Cycle Cost fortemente influenzato dai costi della logistica, e quindi di identificare tra queste, quella che presenta a parità di prestazioni il LCC minore: lo scopo è dunque cercare un compromesso tra prestazioni e costi (COST-EFFECTIVE).

Alcuni requisiti operativi, utili per la valutazione del LCC di una soluzione sono:

- Accessibilità all'uomo
- Condizioni ambientali d'impiego
- Mobilità richiesta
- Autonomia richiesta
- Numero e dislocazione geografica
- Tipo di personale
- Tasso di impiego previsto
- Tasso globale di guasto accettabile
- Tempo totale di ripristino accettabile capacità e struttura organizzativa dell'utente.

2.3 Filosofia della manutenzione

I principali aspetti della filosofia di manutenzione che derivano dai requisiti operativi sopradescritti riguardano:

- **Approccio manutentivo:** determina la politica di manutenzione da utilizzare, se intesa ad evitare il verificarsi delle failures o piuttosto ripristinare la funzionalità in caso di guasti.

- **Livello di sostituzione:** determina se la riparazione avviene per sostituzione di componenti, moduli, sottoassiemi o unità funzionali.
- **Livelli di manutenzione:** quando il tempo di ripristino accettabile è troppo breve e/o la complessità del sistema troppo grande per poter permettere la ricerca del componente guasto direttamente sul sistema, si può decidere di operare la manutenzione su più livelli sostituendo al primo livello unità complete o sottoassiemi, e ai livelli successivi parti di minore dimensione. Si può arrivare fino a 3 successivi livelli di manutenzione, i quali possono essere organizzati e gestiti tutti, o in parte, dall'utilizzatore e/o dal produttore.
- **Località manutentiva:** può essere lo stesso luogo dove è installato e utilizzato il sistema, oppure presso un centro di manutenzione dove il sistema viene trasportato in caso di guasto.
- **Tipo di personale:** può essere direttamente coinvolto nella manutenzione sia il personale dell'utente sia quello di un'organizzazione indipendente da esso.
- **Affidabilità di missione:** probabilità che il sistema svolga in maniera adeguata le prestazioni richieste per la durata della sua missione.
- **Prontezza operativa:** probabilità che il sistema sia in condizioni di funzionalità quando viene impiegato per la sua missione in un dato istante.
- **Disponibilità operativa:** probabilità che il sistema sia operativo in un istante qualunque quando è operato e mantenuto secondo le norme prestabilite.

I gradi di libertà nella scelta della filosofia di manutenzione sono tanto maggiori quanto più originale è il sistema operativo. Per tale ragione l'analisi degli aspetti appena descritti va condotta con cura e tempestività, al fine di individuare possibili varianti e innovazioni migliorative alle filosofie esistenti.

2.4 Strumenti della logistica

2.4.1 Analisi del costo del ciclo di vita LCCA

Come sopracitato uno strumento fondamentale della logistica è l'LCCA che si pone come obiettivo principale di identificare tra più alternative ad un dato problema quella che risulta la più *Cost-Effective*. Per un prodotto o sistema questo parametro viene misurato come rapporto tra la efficacia del sistema ed il suo costo totale del ciclo di vita LCC dove:

- **Efficacia del sistema** = *Capacità Funzionale* * *Disponibilità Operativa*;
è funzione sia delle caratteristiche tecniche sia di quelle logistiche del sistema;
- **Costo totale del ciclo di vita** = *Costi di acquisizione* + *costi operativi*;
è la sommatoria di tutti i costi che gravano sull'utente sia per l'acquisto che per l'esercizio di sistema.

Come conseguenza di tale definizione i costi da considerare (LCC) sono tutti quelli che afferiscono al sistema in esame, dalla sua nascita, alla sua morte inclusa la sua eliminazione per obsolescenza.

Concettualmente la LCCA consiste nell'associare ad ogni soluzione di progetto il corrispondente LCC, e tramite un confronto, nell'adottare la soluzione più conveniente. Gli strumenti metodologici usati si differenziano notevolmente tra di loro, a seconda della fase in cui vengono applicati ed evolvono da una serie di stime grossolane a metodologie relativamente raffinate di analisi di calcolo e valutazione.

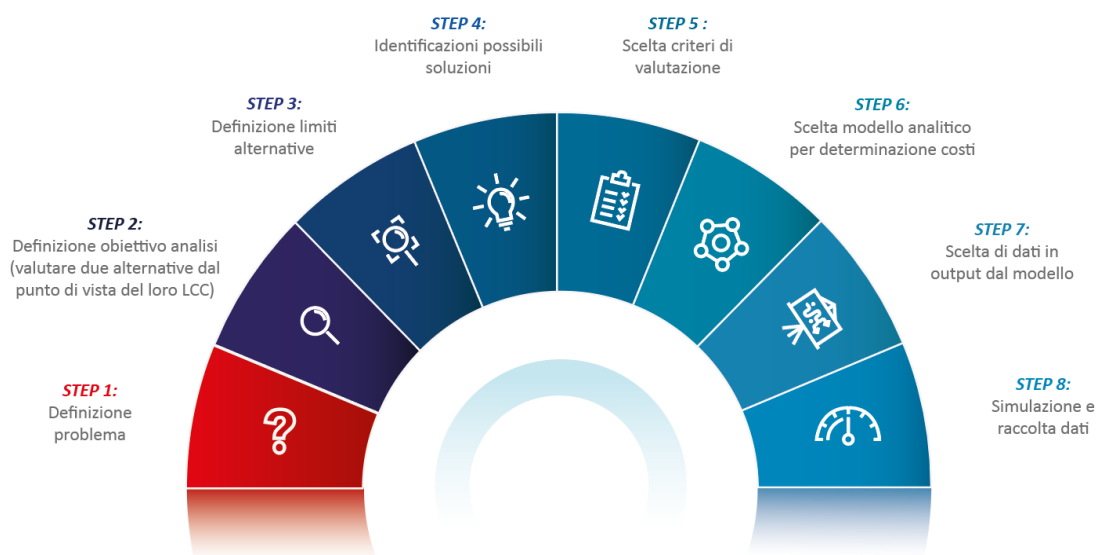


Figura 1 Step metodo LCCA

È importante quindi, sin dalle prime fasi del progetto, tenere in considerazione il fatto che i costi del supporto non sono mai trascurabili rispetto a quelli di acquisizione del sistema primario e possono in alcuni casi essere anche dello stesso ordine di grandezza, se non superiori a questi ultimi, ed in questo senso il design to cost deve costituire uno dei più importanti metodi di lavoro dell'ingegneria logistica.

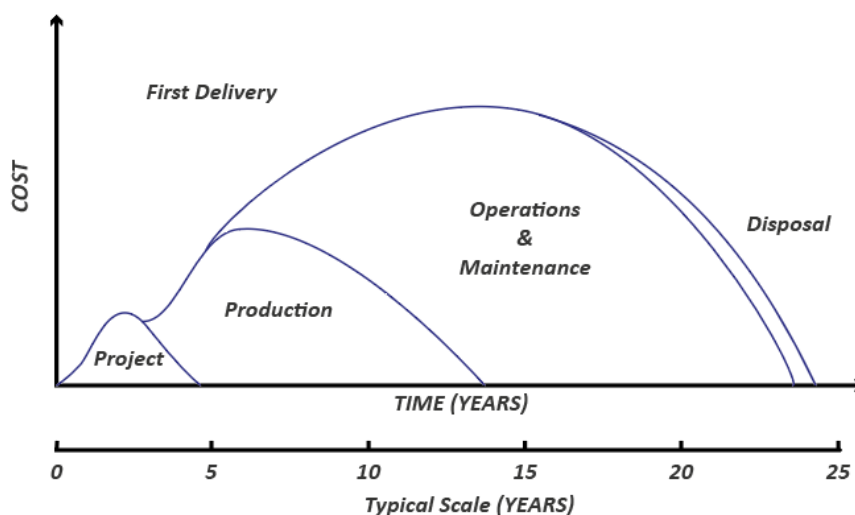


Figura 2 Costi vita operativa

Tramite il design to cost si introduce il costo del ciclo di vita LCC del sistema come uno dei parametri di progetto insieme con le prestazioni tecniche, la efficacia operativa, gli aspetti logistici.

I costi assumono così un ruolo attivo nel progetto anziché costituire una delle risultanti del processo progettuale e possono perciò orientare le valutazioni e i criteri di scelta per la realizzazione finale di un sistema soggetto a studio.

3 MANUTENZIONE

La crescente complessità delle macchine usate nei diversi settori industriali, richiedono una costante attenzione per lavorare alla massima efficienza: sono per tal motivo necessari aggiustamenti vari, volti a impedire deterioramenti locali che risulterebbero in guasti.

La manutenzione ha lo scopo di rispondere a tale necessità mettendo in campo una serie di azioni volte a garantire la disponibilità dei sistemi, l'economicità della loro conduzione, la sicurezza del lavoro e la sicurezza ambientale.

3.1 Problematiche della manutenzione

La manutenzione costituisce una parte cospicua del costo operativo di un sistema. A fronte di questo onere si attende non solo di poter riavere prima possibile il sistema operativo, ma anche di minimizzare gli effetti negativi dei guasti:

- Effetti sulla sicurezza qualora funzioni di sicurezza del sistema vengano inibite dal guasto
- Effetti economici dovuti al fermo - macchina
- Disturbi arrecati all'attività di altri sistemi
- Onere economico per effettuare la riparazione

Si noti che l'interesse dell'utilizzatore di un sistema sia:

- Se possibile evitare (prevenire) il verificarsi del guasto
- Sia che il guasto sia avvenuto, sia che lo si riesca a prevenire, minimizzare la durata delle operazioni che comportano il fermo macchina, generalmente assai più oneroso da un punto di vista economico, del costo della riparazione.

Aumentando l'efficacia dei provvedimenti manutentivi per la prevenzione o predizione dei guasti, si avrà una riduzione dei costi ad essi dovuti a fronte di un maggior onere sostenuto per ovviare ai guasti stessi.

3.2 Livelli di Manutenzione

La manutenzione è solitamente stratificata su più livelli. Nella specifica internazionale ILS relativa alla Logistics Support Analysis (ref. "S3000L - International procedure specification for LSA"), ci si riferisce a tre livelli manutentivi:

1. Livello 1: l'obiettivo è assicurare la disponibilità del Prodotto. Le unità guaste devono essere facilmente e velocemente sostituibili dal personale manutentivo in caso di malfunzionamenti. Sono inoltre previste attività di
 - a. Servicing
 - b. Ispezioni pre- e post-volo
 - c. Check funzionali
 - d. Troubleshooting
 - e. Manutenzione correttiva (Sostituzione apparati, regolazioni e riparazioni semplici)
 - f. Modifiche semplici
 - g. Caricamento software e raccolta dati
2. Livello 2: l'obiettivo è mantenere il più elevato livello possibile di disponibilità del Prodotto. Le attività comprendono:

- a. Riparazione a livello di moduli degli apparati rimossi
 - b. Ispezioni schedate
 - c. Riparazioni strutturali moderate
 - d. Test su banchi prova
 - e. Le attività possono svolgersi sul Prodotto o in specifiche officine per la manutenzione, solitamente presso la base del Cliente
3. Livello 3: anche in questo caso l'obiettivo è assicurare la massima disponibilità del Prodotto, fornendo tutto il supporto ingegneristico richiesto. Le attività, salvo che per apparati selezionati, sono solitamente effettuate presso il Fornitore o l'OEM della parte. Le attività previste sono:
- a. Revisione (Overhaul) delle parti
 - b. Riparazioni che eccedono le capacità manutentive del Cliente
 - c. Riparazioni strutturali complesse
 - d. Ispezioni schedate
 - e. Modifiche software

3.3 ILS nella fase di progetto

Come si evince da quanto sopra scritto, un requisito fondamentale è soddisfare un bisogno al minimo costo. Applicazioni sperimentate sui diversi sistemi ad alta tecnologia, hanno mostrato che azioni miranti al controllo e all'ottimizzazione dei costi intraprese nelle fasi di sviluppo del prodotto, incidono sul LCC finale nella misura globale del 95%, raggiungendo livelli del 65% di incidenza finale nella fase di definizione concettuale.

Si deduce:

- La necessità di considerare i costi un elemento di progetto allo stesso livello di approfondimento degli altri requisiti.
- La opportunità del coinvolgimento dell'elemento costo sin dalle prime fasi dell'attività di progettazione e sviluppo del prodotto.

3.3.1 Analisi e previsioni di manutenibilità

È difficile definire dei fattori numerici che descrivono le caratteristiche di manutenzione che un sistema deve soddisfare. Per tal motivo si impongono a priori dei **requisiti qualitativi e altri quantitativi**:

- **Qualitativi**: complessità minima, accessibilità massima, numero minimo di banchi di prova
- **Quantitativi**: Down time, Repair Time, Turn Around Time, MTTR

Si passa poi alla scelta dei **criteri di progetto della manutenibilità** di un sistema che sono tra loro fortemente intercorrelati. I principali sono:

- Diagnosticabilità
- Accessibilità
- Manutenibilità e scarto

Poiché il tempo di riparazione viene per lo più speso per ricerca del guasto, deve essere posta grande enfasi nella previsione dei dispositivi e procedure che svolgono compiti di ausilio efficace nel campo delle tecniche diagnostiche. Una volta che il guasto è stato isolato anche la riparazione

in sé può portare via molto tempo, dipendendo questo dal dove, come, quando la riparazione è effettuata.

Quindi compito del progettista è:

- Minimizzare la necessità del supporto
- Minimizzare i tempi di fermo
- Minimizzare il costo di supporto
- Minimizzare i requisiti riguardanti il personale addetto
- Minimizzare gli errori di manutenzione
- Massimizzare l'efficacia e l'economia

3.4 Filosofia e politica di manutenzione

La manutenzione è definita come l'insieme delle operazioni mirate ad assicurare e mantenere i livelli di sicurezza e di affidabilità propri del sistema in oggetto e ripristinare tali livelli a quelli di progetto, se durante l'attività della macchina, a causa di fenomeni di deterioramento, si ha una perdita nei parametri di sicurezza e affidabilità. Il tutto ottenuto al minimo costo. I parametri più indicativi sono:

- Le avarie
- L'età operativa degli apparati
- La sicurezza
- L'economicità di servizio

Le relazioni analitiche ed empiriche fra i citati parametri portano a definire la logica del programma di manutenzione.

3.4.1 Avarie

Per avaria si intende una condizione non soddisfacente delle prestazioni di un apparato. Una avaria non è tale se non quando viene rilevata attraverso strumenti o osservazione diretta. Si distinguono due tipi di avaria:

- **Avaria Potenziale:** definita come una particolare condizione, identificabile fisicamente, che rivela un'avaria imminente.
- **Avaria Funzionale** condizione di incapacità dell'apparato ad essere conforme alla prestazione standard.

Sulla base di questo criterio possiamo quindi suddividere le avarie funzionali in due categorie:

1. Evidenti
2. Occulte

L'identificazione delle avarie potenziali ha il vantaggio di evitare le avarie funzionali e ha la capacità di utilizzare la maggior parte della vita di impiego dell'apparato e del sistema.

3.4.2 Affidabilità in manutenzione

Se si sottoponessero a prove di funzionamento un certo numero di esemplari di uno stesso apparato, si potrebbe ricavare sperimentalmente l'andamento del **Tasso di Guasto (TG)** nel tempo:

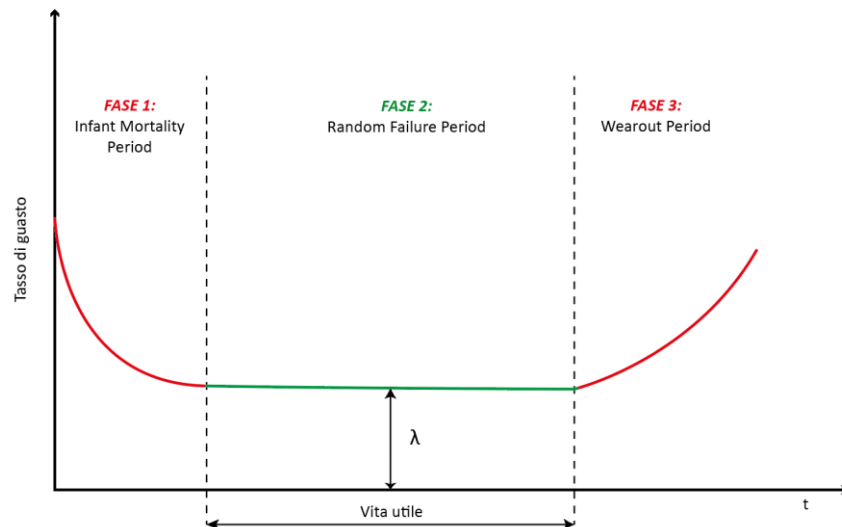


Figura 3 Curva distribuzione vasca da bagno

$$TG = \frac{Na}{Nc * N(ore)}$$

Dove

- Na = Numero di Avarie registrate,
- Nc = Il numero di esemplari funzionanti
- N = L'unità di tempo trascorso, ad esempio ore.

Con riferimento al diagramma, è riportata una tipica curva del TG, nota come “vasca da bagno”. Essa può essere suddivisa in 3 zone:

1. **Guasti infantili**: causati principalmente da errori progettuali oppure errori nell'utilizzo della nuova attrezzatura dettati dall'inesperienza. Vengono tenuti sotto controllo ed eliminati mediante prove prolungate, collaudi rigorosi e mediante rodaggio operativo ben controllato.
2. La maturità del pezzo è invece caratterizzata da cause di **guasto del tutto casuali** e rappresenta il livello più basso di rateo di avaria, che rimane approssimativamente costante durante un periodo di tempo chiamato vita utile.
3. **Guasti per usura e fatica**.

Sulle avarie casuali si basa principalmente l'affidabilità degli apparati nel periodo di vita utile. Il compito della manutenzione quindi è quello di limitare il numero delle avarie determinando la loro distribuzione nel tempo, in modo da dedurre gli intervalli di sostituzione e di revisione e atti a prevenire i guasti d'usura, nonché la lunghezza della vita media del componente.

La ricerca e analisi delle avarie e della loro frequenza è l'attività che permette di ricavare la curva di affidabilità del sistema, cioè la previsione del comportamento del sistema in condizioni operative determinate, o meglio, una previsione delle probabilità di corretto funzionamento dello stesso per un certo tempo e determinate condizioni ambientali e di lavoro.

Nota la distribuzione statica dei failures per ogni tipo di avaria, è possibile dedurre il metodo di calcolo che permetta di esprimere la frequenza delle avarie e quindi la probabilità del verificarsi di

quest'ultime. Le avarie casuali sono distribuite a intervalli piuttosto regolari nel tempo. Questi ultimi presentano una funzione di affidabilità esponenziale esprimibile con la funzione:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Ove:

- λ = rateo di avaria, supposto costante e t è il tempo di impiego del pezzo considerato entro il tempo di vita utile.
- t = il tempo di impiego del pezzo considerato entro il tempo di vita utile.

Il parametro λ determina l'affidabilità del componente. Il reciproco del rateo di avaria si definisce MTBF ovvero MEAN TIME BETWEEN FAILURES per cui:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

La affidabilità ossia la funzione di sopravvivenza si può quindi esprimere come:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

3.5 Concetti base sulla manutenibilità

3.5.1 Manutenibilità e disponibilità

Tra tutti gli aspetti quello dell'affidabilità logistica è il più importante. Per affidabilità si intende la capacità di un sistema di svolgere una determinata funzione, sotto specifiche condizioni, per un dato intervallo di tempo. Per il calcolo di tale parametro possono essere utilizzati due approcci:

- **Joint Probability Theorem:** eventi multipli si verificano se accadono tutti gli eventi singoli
- **Total Probability Theorem:** l'evento si verifica se accade almeno un singolo evento

Utilizzando un Reliability Block Diagram (RBD) si possono individuare in maniera chiara e immediata le relazioni logiche che intercorrono tra i componenti di un sistema connessi tra di loro. Si utilizza il teorema Total Probability per stimare parametri di sicurezza, mentre il teorema Joint Probability per stimare l'affidabilità logistica di un sistema.

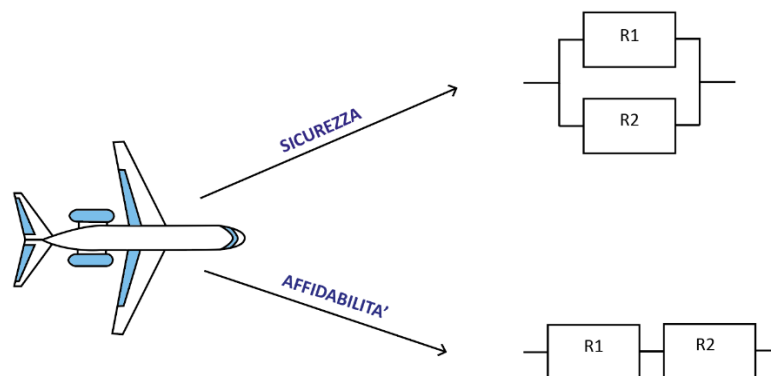


Figura 4 Affidabilità logistica

Maggiore è la probabilità di guasto maggiore sarà l'importanza di ottimizzare la manutenzione: tale problema è particolarmente accentuato nei moderni aeromobili dotati di sistemi ad elevata complessità ed elevato onere economico. L'elevata complessità causata dalle accresciute prestazioni, nonché dagli elevati livelli di affidabilità di missione e di sicurezza richiesti, comporta un calo dell'affidabilità logistica.

Per compensare tale decremento si è data, e si dà grande importanza alla manutenibilità definita come "l'attitudine di una data attrezzatura ad essere mantenuta o ad essere riportata, in un prefissato periodo di tempo, in uno stato nel quale può svolgere la funzione richiesta".

Si può così ottenere una riduzione significativa del tempo mediamente impiegato per manutenzione, mantenendo entro valori accettabili i periodi di fermo macchina malgrado il numero di interventi manutentivi resi necessari dall'elevata complessità. La percentuale di tempo in cui il sistema non è in manutenzione e quindi è operativo, è indicata con il termine disponibilità (Availability). Appare ovvio come la disponibilità sia da un punto di vista operativo di fondamentale interesse per gli utilizzatori di sistemi e come possa essa essere perseguita o aumentando la affidabilità logistica o migliorando la manutenibilità.

3.5.2 MTTR e sua influenza sulla Disponibilità

La manutenibilità di un sistema è quantificata come il tempo mediamente necessario per interventi manutentivi sul sistema stesso. Tale tempo indicato con **MTTR** (Mean Time To Repair) sarà la media dei tempi mediamente necessari per compiere le varie operazioni di riparazione, media pesata dalla frequenza di tali operazioni:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i * t_i}{\lambda_{tot}}$$

Dove:

- λ_i = tasso del guasto i – esimo
- $\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ con n numero dei tipi di interventi manutentivi

Per quanto riguarda i tempi t_i mediamente necessari per lo svolgimento delle varie operazioni saranno ricavabili come valori medi delle distribuzioni dei tempi di lavoro che si riscontrano per ogni operazione.

MTTR dipende sì dalla manutenzione ma anche dal livello di capacità di chi effettua l'operazione e dalle caratteristiche dell'organizzazione di manutenzione.

Di conseguenza, la disponibilità intrinseca del sistema (*Inherent Availability*) può essere espressa nella seguente maniera:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Da cui ricordando che $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ sia che:

$$MTTR * \lambda = \frac{1}{A_i} - 1$$

Per minimizzare l'MTTR facendo riferimento alle fasi di una tipica manutenzione si può:

1. Prima fase: comprendere in base ai sintomi del sistema quale sia il componente guasto. Diagnosi parte più importante di tutta la manutenzione
2. Seconda fase: migliorare l'accessibilità al componente guasto.
3. Terza fase: rimozione e sostituzione. In questo caso la caratteristica fondamentale è la modularità, al fine di ridurre le scorte immagazzinate di uno stesso apparato. Aumentando il numero di moduli che svolgono funzione diverse all'interno del sistema, si ridurrà la complessità e quindi il numero di guasti del singolo modulo. Questo tuttavia comporterà una diminuzione dell'affidabilità logistica del sistema.

3.6 Dinamica della filosofia di manutenzione

3.6.1 Hard time (H.T.)

Un grande passo avanti nel campo della manutenzione degli aeromobili fu fatto nel 1958, anno che rappresenta la transizione dai sistemi ad elica ai jets. Fino a tale data la manutenzione veniva programmata a scadenze fisse sia per accessori che per parti strutturali con scadenze denominate "Hard Time" o TBO (Time Between Overhaul). Tali scadenze erano stimate attraverso il calcolo della vita utile dell'item, al fine di evitare dunque la zona del guasto da usura.

Il metodo, se utilizzato in modo appropriato con intervalli ottimizzati per la sostituzione contemporanea di più parti, è un eccellente ed economico procedimento di controllo di manutenzione. Si ha così il risultato di ottenere il massimo impiego di componenti che non andrebbero mai in avaria sull'aeromobile, evitando così gli inconvenienti coinvolti in tali eventi, compresi i problemi connessi con il dimensionamento delle scorte.

3.6.2 On Condition (OC)

Dagli anni 60 in poi, con l'avvento dei jets si è avuto un grandioso processo di accelerazione riguardante l'aumento del numero e di complessità degli aerei nonché delle loro prestazioni e dei diversi scenari di utilizzo. Nacquero quindi diverse esigenze economiche.

Si comprende perché l'attenzione fosse rivolta a diminuire i costi di manutenzione, anzi gli stessi costruttori furono sollecitati a predisporre progetti che tenessero in conto la capacità di minimizzare i costi della manutenzione. Il progetto si occupa di prevedere l'inserimento di accessori semplici più affidabili, di facile accessibilità di lungo impiego e di ridotta manodopera.

Tramite un'accurata analisi LCC si ricercano le alternative che permettono l'ottimizzazione dei parametri sopracitati.

In tale ottica l'utilizzo di accessori a tempi determinati cioè, a TBO secondo il concetto HT, venne messo in discussione portando ad utilizzare solo parzialmente la vita dell'apparato con le relative implicazioni economiche. Nacque l'idea dunque, che la sostituzione degli item sulla sindrome della loro condizione poteva risultare molto più efficace e meno costosa come criterio; ciò però richiedeva la predisposizione di prove fisicamente idonee e di misure dei parametri funzionali a regolari intervalli di tempo portando così a definire il processo "on condition". Questo processo è applicabile solo a componenti sui quali un giudizio di aeronavigabilità può essere emesso sulla base di una ispezione a vista, di alcune misure da eseguire in loco, di prove specifiche ed altri metodi ad esclusioni delle ispezioni che richiedono la rimozione. Nel caso OC si deve avere la possibilità di valutare la condizione di decadimento delle prestazioni del componente e deve essere possibile raccogliere dati sufficienti a quantificare tale decremento di prestazioni che può portare all'avaria.

3.6.3 Condition Monitoring (CM)

Non è un processo preventivo. Accetta che avvenga l'avaria e si fonda su tutte le informazioni raccolte nel verificarsi delle anomalie durante l'impiego delle parti, e sulle modalità riscontrate ad avaria avvenuta per poter intraprendere le azioni necessarie a migliorare le cose.

I componenti che sono inseriti sotto il programma di manutenzione CM, non sono soggetti ad alcun intervento per valutare la condizione, la vita residua, il degrado delle prestazioni, ne sono soggetti ad essere sostituiti prima dell'avaria, per tal motivo la loro sostituzione è un'operazione non programmata. Gli accessori soggetti a CM:

- Non devono influire sulla sicurezza
- Devono avere funzioni direttamente evidenti agli equipaggi di volo

I sistemi ai quali può essere applicato tale programma di manutenzione sono gli impianti avionici di navigazione, di comunicazioni, le luci, gli strumenti poiché la ridondanza degli impianti evita la diretta relazione di causa-effetto fra funzionalità e sicurezza. L'applicabilità del CM necessita di un programma di data collection ed un sistema di analisi dei dati basati sul numero degli sbarchi programmati e casuali, segnalazioni di avarie, ratei di avarie, rapporti piloti, ispezioni particolari, prove funzionali, prove al banco, ricerche di laboratorio, officine etc.

Per esempio, nel caso degli pneumatici del Landing Gear di un velivolo, si susseguono le seguenti fasi:

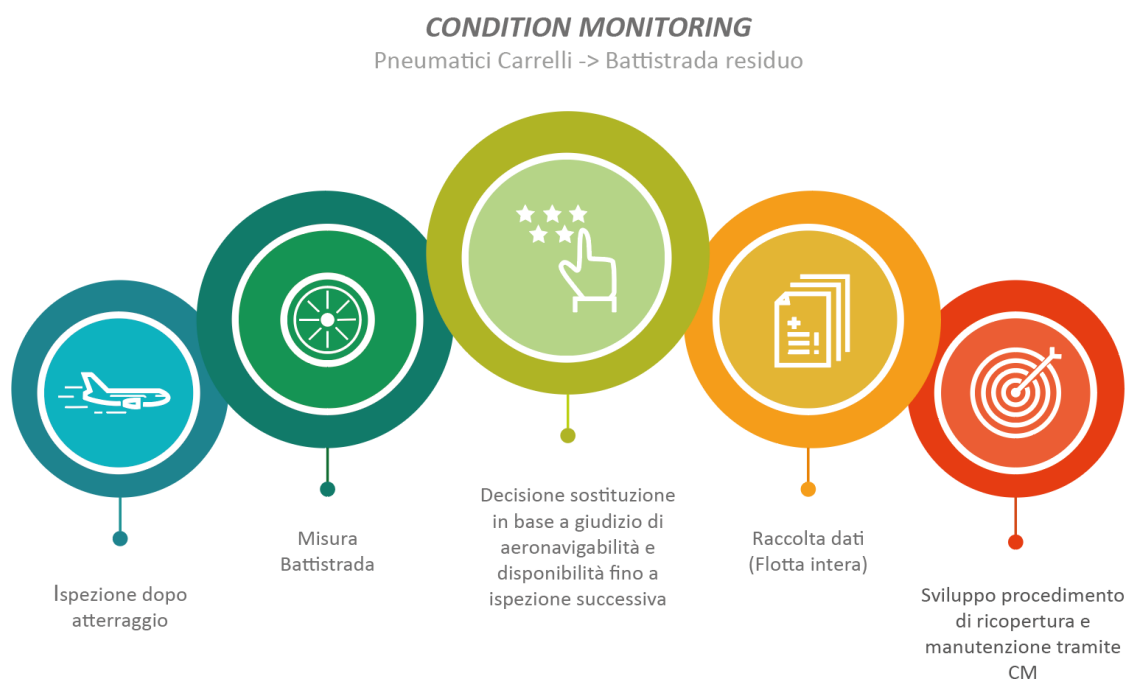


Figura 5 Esempio Condition Monitoring

3.7 Analisi MSG3 (Maintenance Steering Group 3)

Il metodo MSG-3 è un processo di analisi adottato per la determinazione dei programmi di manutenzione in termini di task manutentivi e relativi intervalli di ispezione. Obiettivo primario è la riduzione dei tempi di fermo macchina e dei costi di manutenzione, e quindi l'aumento dell'efficienza del velivolo, nel rispetto dei requisiti di sicurezza richiesti e di affidabilità del sistema durante l'intero ciclo vita del prodotto. Tale procedura prevede una prima fase di suddivisione di

ogni sistema in sottosistemi/sotto-sottosistemi gestibili significativamente al più alto livello manutentivo (HML). Per ognuno di questi si determinano le funzioni che devono essere svolte. Nel caso tutte le funzioni importanti non fossero coperte al livello scelto, si dovrà scendere al sottosistema successivo, cercando di evitare ripetizioni di funzioni, gravose per la gestione dell'analisi.

Per ogni funzione si identificano le avarie funzionali possibili, e per ognuna di queste gli effetti e le cause dell'avaria.

Le avarie da intendersi come deviazioni da standards fissati, posso dividersi nelle seguenti categorie:

1. Per funzioni normalmente attive, cioè operanti sempre durante ogni volo, si avranno due tipi di avarie: perdita totale della funzione e perdita parziale della funzione
2. Per funzioni normalmente inattive, cioè operanti solo in casi particolari emergenze si avrà: funzione non disponibile quando richiesta e intervento inadeguato della funzione;
3. Le funzioni part-time, usate almeno una volta al giorno o in fasi particolari del volo, vengono considerate al pari di quelle normalmente attive;
4. Le funzioni stand-by usate saltuariamente, vengono considerate come le normalmente inattive.

3.7.1 Livelli diagramma logico

Il metodo prevede l'analisi delle avarie e l'individuazione del possibile task manutentivo attraverso due livelli decisionali: al primo di ciascuna avaria si determinano le ripercussioni in termini di sicurezza, operatività ed economicità; al secondo per ciascuna causa di avaria si individua il tempo di intervento preventivo più conveniente.

Primo livello

L'analisi viene svolta seguendo un diagramma decisionale che conduce a cinque percorsi differenti a seconda delle ripercussioni dell'avaria. Il diagramma logico è costituito da 4 domande:

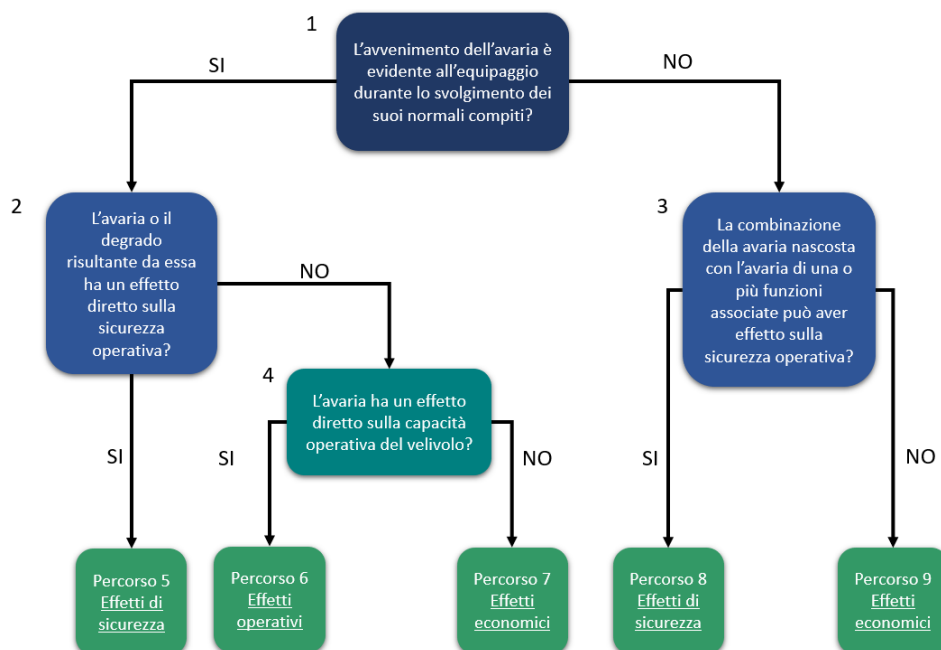


Figura 6 Flowchart MSG-3

La prima domanda ha l'intento di separare le avarie evidenti da quelle nascoste. Viene chiesto se l'equipaggio durante lo svolgimento del lavoro routinario, sia in grado di verificare la perdita della funzione in esame al momento che essa avviene tramite gli strumenti di bordo o indizi fisici quali vibrazioni, odori etc.

Si considerano nascoste le avarie di funzioni stand by, saranno invece evidenti le avarie di funzioni normalmente attive e di funzioni part time nella cui categoria rientrano tutte quelle funzioni sicuramente usate su base giornaliera.

La seconda domanda serve a verificare se l'avaria o il degrado della funzione compromette la sicurezza operativa del velivolo cioè se l'avaria da sola procura conseguenze definite catastrofiche o rischiose con un rateo superiore a estremamente improbabile o estremamente remoto.

La terza domanda chiede invece se la avaria nascosta combinata con l'avaria di una o più funzioni connesse a quella in esame possa porre a repentaglio la sicurezza operativa del velivolo. Anche in questo caso se la probabilità della combinazione di avarie fosse inferiore ai valori posti come obiettivo la sicurezza non viene considerata inficiata

La quarta domanda serve a verificare se l'avaria o il degrado di una funzione evidente possano compromettere l'operatività del velivolo nonché limitarne la missione.

Secondo livello

Prende in esame le cause delle avarie funzionali, confrontandole con una lista di operazioni manutentive per determinare le operazioni applicabili; tale lista considera prima le operazioni più semplici e meno costose, poi le più complesse e più costose. La lista, variabile a seconda del percorso selezionato al primo livello consiste nella seguente serie di domande:

- È applicabile una lubrificazione o un rifornimento?
- È l'equipaggio in grado di quantificare il degrado della funzione?
- È applicabile una prova per testare l'operatività della funzione?
- È applicabile una prova per testare il degrado della funzione?
- Vi è un'operazione sul componente capace di ridurre il rateo di avaria?
- È una rimozione in grado di evitare avarie o di ridurre il rateo?

La risposta affermativa ad una domanda consente di non proseguire nelle altre domande; ciò non è però applicabile alla prima domanda oppure se si esce dal primo livello per un percorso di sicurezza: in quest'ultimo caso, è obbligatorio rispondere a tutte le domande ed almeno una risposta deve essere affermativa; in caso contrario si pone in discussione il progetto del sistema/sottosistema in esame.

In merito all'intervallo da considerare per ogni operazione, se essa proviene da un percorso di sicurezza sarà dettato dalle analisi di sicurezza dei sistemi; altrimenti sarà basato sulla esperienza di componenti similari e sui dati di affidabilità dichiarati dalle ditte costruttrici. Per alcuni accessori che inficiano la sicurezza e che hanno un alto costo può essere necessario un piano di campionatura per stabilire il migliore intervallo di revisione.

3.8 RCM

La manutenzione centrata sull'affidabilità (RCM) è una strategia proattiva che mira ad ottenere la massima affidabilità dei sistemi e una durata prolungata al minor costo. L'implementazione identifica le funzioni specifiche dei sistemi nel loro esatto contesto operativo. Quindi vengono identificati gli standard di prestazione dell'apparecchiatura per ciascuna funzione e i guasti definiti quando gli standard di prestazione non sono soddisfatti. Sulla base delle conseguenze di guasti, viene applicato un programma di manutenzione con tecniche di monitoraggio delle condizioni (CM) per identificare i guasti potenziali in modo accurato e rapido, in modo da impedire il loro deterioramento fino ad arrivare al guasto funzionale. Pertanto, la durata di utilizzo delle apparecchiature viene estesa e le conseguenze di guasti funzionali vengono ridotte o evitate.

I moderni sistemi di produzione industriale sono stati progettati con una maggiore affidabilità e una maggiore capacità produttiva per soddisfare obiettivi di produzione e qualità più esigenti. Ma essendo diventata più complessa la manutenzione, è nata l'esigenza di ottenere una maggiore competenza tecnica per realizzare piani di manutenzione che riescano effettivamente a dare dei benefici: l'RCM mira a raggiungere questo scopo.

Le strategie di manutenzione tradizionali, basate esclusivamente su azioni temporali come ispezioni, assistenza, sostituzioni di componenti importanti e revisioni, si stanno rivelando inadeguate. Queste si basano sul presupposto che l'affidabilità dell'attrezzatura si deteriora con l'età. RCM contraddice questa visione tradizionale.

Identificando la natura dei guasti, RCM specifica una strategia che riduce le conseguenze di quest'ultimi sui sistemi, e applicando correttamente le tecniche di monitoraggio delle condizioni, RCM è in grado di prevenirli.

3.8.1 Tecniche di Condition-Monitoring

Il monitoraggio delle condizioni si basa sul fatto che la maggior parte delle failures fornirà un tipo di avviso ad indicare che si verificheranno. Questo avviso è definito un potential failures, ed è l'indicazione fisica che si sta verificando un errore funzionale. Le tecniche di monitoraggio delle condizioni utilizzate per rilevare potenziali guasti sono chiamate attività "on-condition". L'apparecchiatura viene ispezionata, testata o monitorata e quindi lasciata in servizio a condizione che continui a soddisfare gli standard prestazionali specificati. La frequenza di queste azioni per determinare se l'apparecchiatura verrà lasciata in servizio è determinata dall'intervallo P-F, che è l'intervallo tra l'identificazione di un potential failure (punto P) e il suo deterioramento in un guasto funzionale (punto F).

L'aggiunta ragionevole di tecniche di monitoraggio delle condizioni a un programma di manutenzione preventiva (PM) offre la promessa di un programma orientato al rilevamento più efficace.

Con le moderne tecniche di monitoraggio delle condizioni, i potenziali guasti possono essere rilevati prima, determinando un intervallo P-F più lungo. Ciò significa che è disponibile più tempo per intraprendere le azioni che eviteranno guasti funzionali e le loro conseguenze.

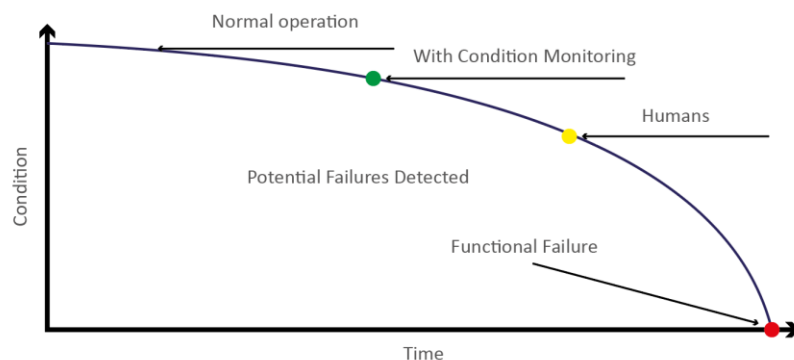


Figura 7 Conditon Monitoring: Potential Failure Detection

3.8.2 Implementazione RCM

L'implementazione segue una procedura suddivisa in otto fasi, a partire dalla selezione degli item più critici e termina con un programma completo che incorpora RCM:

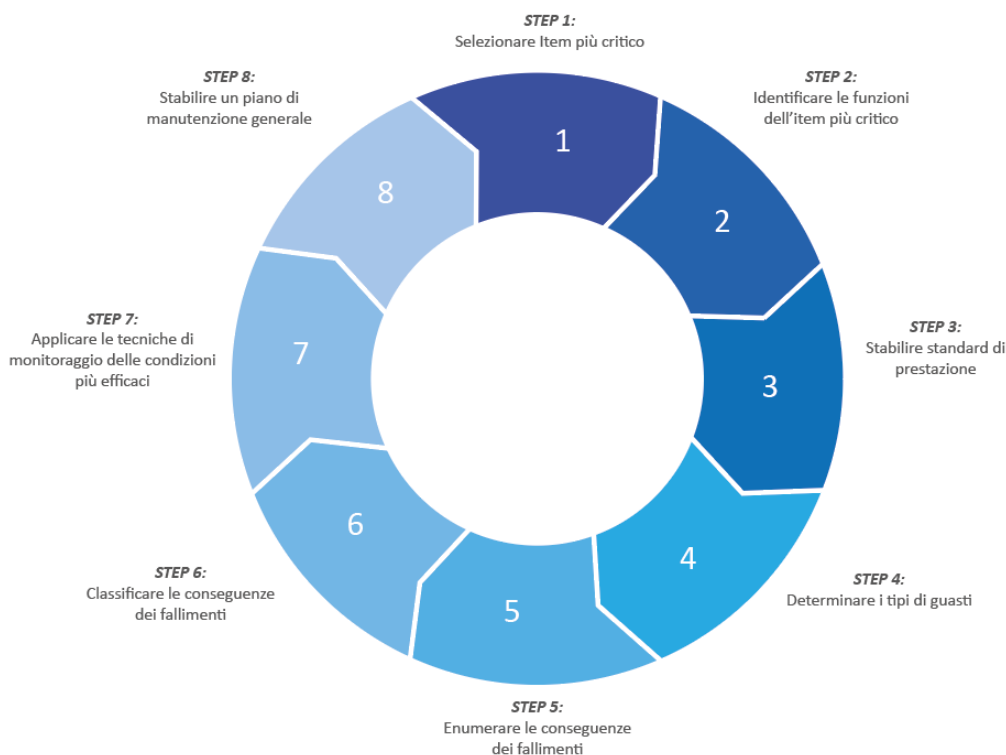


Figura 8 Step RCM

Con la disponibilità di tecniche di monitoraggio delle condizioni più efficaci e affidabili, le condizioni dei sistemi possono essere osservate più accuratamente. Ciò consente ai sistemi di rimanere in servizio più a lungo, a condizione che continuino a soddisfare i propri standard prestazionali anziché sostituire il componente problematico al primo segnale di potenziale guasto. A sua volta, questo approccio permette di ottenere una durata di vita significativamente maggiore di componenti e unità.

3.8.3 Costo della manutenzione

Il costo totale per mantenere le apparecchiature in condizioni affidabili è influenzato dal costo dei guasti non evitati. Questi rappresentano il 300% in più rispetto ai costi di manutenzione che avrebbero potuto evitarli. I programmi di manutenzione più competenti agiscono per ridurre i costi di manutenzione. Ma la corretta applicazione di RCM intacca il costo del fallimento. Quando questi guasti vengono evitati o mitigati, la maggiore affidabilità delle apparecchiature rappresenta un significativo risparmio sui costi che si riflette in ultima analisi nella redditività degli impianti.

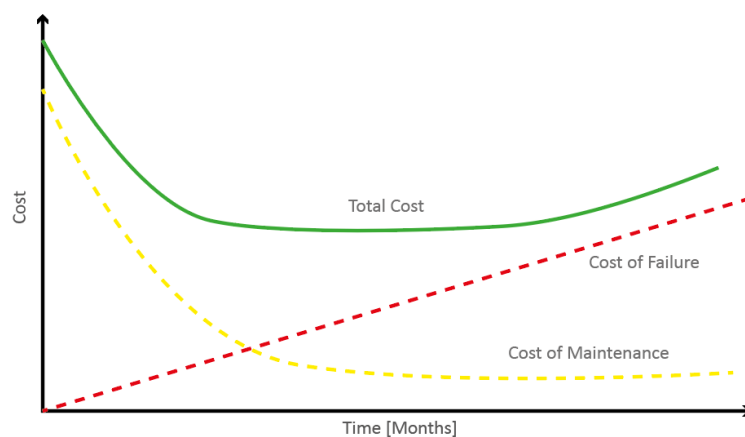


Figura 9 Costi manutenzione RCM

4 APPROVVIGIONAMENTO

4.1 Introduzione

Storicamente, l'attività di approvvigionamento è stata un processo consolidato con piccole variazioni dal punto di vista procedurale. Il cliente identificando il proprio requisito, passa gli ordini al fornitore che li accetta e dopo uno specifico intervallo di tempo li consegna.

In campo aeronautico, l'approvvigionamento si è evoluto, dovendo tenere conto non soltanto della domanda di ricambi del Cliente, ma anche della complessità del sistema velivolo, dell'utilizzo della macchina in scenari che prevedono più scenari operativi, più basi, più depositi, oltre che dei requisiti di disponibilità della macchina richiesti.

4.1.1 Classificazione Ricambi

In funzione della scomposizione tecnica (breakdown del sistema di appartenenza), i ricambi possono dividersi nelle seguenti categorie:

1. Equipaggiamenti
2. Componenti necessari per le riparazioni degli equipaggiamenti
3. Elementi strutturali semplici
4. Elementi strutturali complessi di altissimo valore
5. Materiali standard (viti, o-ring, ...)
6. Materiali ausiliari

In funzione invece della modalità di sostituzione la classificazione può effettuarsi nel modo seguente:

1. Equipaggiamenti sostituibili in linea di volo, *Line Replaceable Units (LRU)*;
2. Componenti utilizzabili dal Cliente per: riparazioni in officine annesse alla linea di volo e riparazioni in officine dedicate all'attività di manutenzione vera e propria;
3. Componenti utilizzabili presso ditte riparatrici.

4.1.2 Parametri fondamentali

È necessaria un'affidabile analisi di supporto logistico del sistema principale e di tali parametri:

- Definizione dei livelli di manutenzione e in senso lato di tutta l'organizzazione di manutenzione
- Definizione dei contenuti dell'attività di manutenzione
- Definizione delle attrezzature di supporto a terra
- Dati disponibilità
- Dati affidabilità e manutenibilità
- Dati di efficacia dei costi di sistema
- Life cycle cost ed in particolare:
 - Costo di riparazione/revisione
 - Costo degli ordini
 - Costo di giacenze
- Modalità inconvenienti e relativi effetti

- Disponibilità delle pubblicazioni tecniche
- Definizione del tipo di addestramento e delle capacità tecniche del personale
- Organizzazione logistica dell'utilizzatore
- Dati operativi
- Particolari non riparabili
- Particolari di consumo
- Frequenza di sostituzione
- Livelli di scorta
- Livelli di scorta di sicurezza
- Lista particolari di alto costo
- Ciclo, tempi di approvvigionamento
- Tassi di usura
- Vita a magazzino
- Livello di disponibilità ricambi

4.2 Approvvigionamento iniziale

Nel caso di approvvigionamento di scorte iniziali per un Cliente, la prima fase prevede la definizione e la quantizzazione della lista ricambi necessarie a supportare l'attività di volo nel periodo di entrata in servizio del sistema. I requisiti base sono i seguenti:

1. Identificare la parte e il fornitore
2. Determinare il numero necessario da approvvigionare
3. Determinare il costo.

Nell'ambito militare il parametro più importante è generalmente la disponibilità del sistema; in quello commerciale l'affidabilità delle operazioni.

Per quanto riguarda la tecnica di definizione delle parti di ricambio nell'ambito militare si usa normalmente un modello di analisi di livello delle parti, basato sui seguenti parametri:

- Dati delle parti
- Profilo della missione
- Capacità di manutenzione ai vari livelli

L'elaborazione utilizza poi dati su:

- Attività di volo
- Quantità necessarie e livelli di sicurezza presso le basi
- Quantità raccomandate dai costruttori

Sono oggi disponibili software commerciali di ottimizzazione scorte, capaci di gestire tutte le informazioni sopra citate e di fornire in output le quantità raccomandate per ogni parte. Questi software sono utilizzati come supporto agli analisti, che possono poi confermare o modificare il risultato in funzione di un loro Best Engineering Judgment.

Modelli di ottimizzazione moderni devono inoltre poter valutare i seguenti parametri:

1. Trade-off tra manutenzione in base e deposito

2. Trade-off tra acquisto di nuove parti di ricambio e riparazione delle parti guaste in funzione dei tempi e dei costi di riparazione
3. Costi di investimento in ricambi al variare del numero delle basi
4. Costi di investimenti in ricambi in funzione dell'utilizzo del velivolo

4.3 Gestione parti di ricambio

La gestione delle parti di ricambio supporta le operazioni di manutenzione che di giorno in giorno permettono al mezzo aereo di essere sempre efficiente ed operativo.

A differenza di altre produzioni quella aeronautica non è mai di grande serie e questo pone problemi di gestione delle scorte per le quali mal si addicono le filosofie di gestione di grossa movimentazione.

La disponibilità immediata in loco della parte produce inoltre la segmentazione dello stock ed il suo allargamento sia in termini di selezione che di quantità con aggravii finanziari. Si consideri, infine, che un velivolo è composto da molte decine di migliaia di parti di ricambio per cui è facile intuire la magnitudo degli identificativi da tenere sotto controllo.

4.4 La gamma di magazzino

4.4.1 Tipi di Ricambi

La scelta della gamma delle parti di ricambio è una attività consequenziale ad una attenta analisi logistica tramite la quale si sono evidenziati, in funzione delle attività di manutenzione previste, tutti i possibili ricambi da approvvigionare. A tali possibili ricambi sono assegnati codici che permettono di identificarli e classificarli (a seconda del livello di manutenzione, del livello di sostituzione, del costo, del tempo di approvvigionamento etc.) e con i quali le funzioni gestionali devono operare per poter fare le proprie scelte tese ad ottenere il massimo servizio al minor costo.

Naturalmente, in questa prima fase, la libertà di scelta delle gestioni di magazzino è limitata in quanto, mancando esperienza di gestione sul prodotto e le sequenze statistiche di Consumo, ci si può affidare solo, per la composizione della gamma, ai dati forniti dalle funzioni a monte.

La prima attività è quella di suddividere tutti gli items in **CONSUMABILI** e **RIPARABILI** utilizzando il "codice di Fonte, Manutenzione e Riparabilità" (SMR) assegnato a ciascuna parte. Avendo separato riparabili dai consumabili la gestione è ora in grado di analizzare questi ultimi, operando una ulteriore scelta tra i comuni ed altre linee di prodotto esistenti, ed i nuovi entranti.

Per quelli comuni con altre linee di prodotto la gestione modificherà i punti di riordino dei lotti sulla base dell'aumento della flotta e delle ore volate, mantenendo costante il tasso di consumo registrato. Per i nuovi entranti calolerà i punti di riordino utilizzando i dati di tempo di approvvigionamento e di lotto economico.

Questa grande famiglia dei consumabili comprende items generalmente di basso valore quali olii, grassi, materiali standard, piccoli assiemmi la cui riparazione o revisione non sarebbe economica e assiemmi approvvigionabili in tempi molto brevi.

La gestione di magazzino, completata questa prima attività, passa all'analisi dei riparabili, in cui la prima fase si dedica alla ricerca di items già noti che, una volta evidenziati, saranno trattati come precedentemente fatto per gli analoghi consumabili, poiché si presuppone che il loro comporta-

mento sul nuovo mezzo aereo sarà simile alla storia di consumo già nota dai modelli già da tempo in servizio.

I nuovi riparabili vengono quindi analizzati per Classi di famiglie iniziando con gli LRU (Line Replaceable Unit) che sono, si può dire, i ricambi per eccellenza. Infatti l'indisponibilità di uno di questi items, che deve essere sostituito sul mezzo aereo stesso, genera la non Disponibilità Operativa del Mezzo per la sua Missione che è, ovviamente, la necessità primaria per cui è stato acquistato.

Per gli altri riparabili l'analisi e selezione avviene sulla base dei dati di MTBF calcolato, fornito dalle funzioni a monte (ILS), cercando di dilazionare il tempo del loro ingresso in magazzino.

Quanto illustrato fino ad ora rappresenta la tecnica maggiormente utilizzata nella fase iniziale del rifornimento del magazzino. Le gestioni utilizzano anche la "similitudine" ovvero l'analisi della storia delle abitudini di acquisto del cliente, della richiesta generata e dallo stesso equipaggiamento montato su altri velivoli o dalle parti di ricambio simili per uso, posizione etc., installati su altri aeromobili.

4.4.2 Miglioramento della Gamma di Magazzino

Una delle regole fondamentali del mercato civile dice che devono essere considerati ricambi da immagazzinare quelli per i quali si è manifestata una domanda minima di un pezzo da due clienti diversi negli ultimi 12 mesi.

Altra regola fondamentale è quella che vieta di considerare consumi validi per le analisi gestionali quelli generati dagli Initial Provisioning e dai contratti di rifornimento per clienti militari. Questa seconda regola tende ad evitare che nelle sequenze storiche dei consumi si evidenzino punte di consumo generate da cause che possono essere diverse da quelle della normale manutenzione della flotta.

La gamma viene quindi quotidianamente valutata utilizzando:

- **Demand Rate:** esso è un dato di statistica riguardante il numero di una stessa parte di ricambio richiesta in una prefissata unità di tempo, il tutto rapportato al numero di ore volate dalla flotta. Questo dato viene confrontato con quello calcolato durante la fase di scelta di gamma; le deviazioni generano, in automatico, la revisione dei livelli delle scorte e di conseguenza le richieste di approvvigionamento.
- **Fill Rate:** questo indice è il rapporto, percentualizzato, di quante righe di un ordine standard hanno trovato soddisfacimento in magazzino, con disponibilità totale e nei tempi richiesti.

4.5 La gestione dello Stock

È necessario quindi offrire al cliente dei parametri che quantifichino la disponibilità delle parti di ricambio quando sono necessari interventi manutentivi per ripristinare la completa efficienza del velivolo.

I parametri caratteristici per effettuare una corretta gestione degli Stock Sono:

- Il punto di Riordino
- La Scorta Minima

4.5.1 Punto di Riordino

È definito come il livello di giacenza che permette di soddisfare le richieste del mercato in attesa che un ordine per parti di ricambio lanciato in quel momento in produzione compia il suo iter normale e rifornisca il magazzino. La formula per la determinazione del suo valore è la seguente:

$$PR = v * T$$

dove:

- v = velocità di consumo ossia numero di elementi di quel tipo consumati in una unità di tempo sufficientemente lungo.
- T = tempo di riapprovvigionamento ossia la durata del ciclo produttivo della parte più la durata dei lavori amministrativi relativi alla preparazione ed al lancio dell'ordine o, in altri termini, il tempo necessario ad ottenere dalla fonte di approvvigionamento i quantitativi necessari al ripristino dei livelli programmati dalle scorte.

I criteri di utilizzazione del Punto di Riordino (PR) sono: sulla situazione reale di magazzino (risultante dallo inventario fisico), sommato alla differenza tra impegni da evadere e ordini di rifornimento già programmati.

4.5.2 Scorta minima

È definita come quantitativo di parti di ricambio di ogni tipo di cui occorre disporre per evitare di esaurire le scorte quando risulti insufficiente il PR (Punto di Riordino). In altre parole è il livello di magazzino che viene utilizzato solamente qualora vi sia una variazione nei due parametri che entrano nel calcolo del PR.

Con l'introduzione della scorta minima l'azienda preventiva la possibilità di errori di calcolo, accettando dunque la costituzione di una giacenza che, in condizioni di gestione ottimale, non dovrebbe venire utilizzata.

Le variazioni (dei due parametri che entrano nel calcolo del PR) alle condizioni normali quando introdotte nella formula per il calcolo del PR la trasformano come segue:

$$PR = (v * T) + (\Delta v * T) + (v * \Delta T)$$

Dove:

- Δv = variazione, su un periodo sufficientemente lungo, della velocità di consumo. La variazione può anche essere istantanea casuale e di grande entità oppure diluita su un lungo periodo e quindi rivelatrice di una nuova tendenza. La variazione istantanea e casuale non provoca rottura di Stock se avviene prima del raggiungimento del PR. È pericolosa se avviene dopo il raggiungimento del PR e del conseguente ordine di rifornimento.
- ΔT = variazione della durata del ciclo di riapprovvigionamento. Può essere dovuta a cause inerenti a:
 - Composizioni del carico di lavoro.
 - Variazione dei tempi tecnici di esecuzione.
 - Variazione dei tempi amministrativi di programmazione.
 - Incidenti ed accidenti (casuali) nello svolgimento delle lavorazioni.

I fenomeni possono verificarsi contemporaneamente e ciascuno può contribuire, con la sua variabilità a compensare o ad accentuare la rottura degli Stock

Il calcolo della scorta minima (SC) si effettua reggendo opportunamente il primo termine della formula precedente che diviene pertanto:

$$PR + Sc = (v * T) + (\Delta v * T) + (v * \Delta T)$$

dove si intende:

$$Sc = (\Delta v * T) + (v * \Delta T)$$

Bisogna infine considerare che la scorta minima (Sc) influisce sulla giacenza media e costituisce un costo di immobilizzo che l'azienda deve sopportare per poter compensare gli errori nella stima delle variabili v e T e per poter avere un'alta operatività della flotta di aeromobili (anche in presenza di situazioni anomale).

4.5.3 Modellazione matematica

Possono essere usati vari modelli per ottimizzare la gestione dello stock. Di seguito si riporta un algoritmo di base che deve essere considerato come il punto di partenza per sistemi molto più sofisticati e complessi ed eventualmente computerizzati. Prima di passare alla realizzazione del modello devono essere tenuti presenti alcuni elementi minimi e considerazioni fondamentali:

1. I riparabili e consumabili devono essere trattati in modo diverso.
2. Un fattore di Sicurezza, che tiene conto dei dati statistici, deve essere usato.
3. Unità e parti di ricambio che appartengono a diverse categorie (valore) devono essere trattate in modo diverso.
4. La distribuzione ed i raggruppamenti degli End Items (cioè i sistemi cui sono destinati i ricambi) devono essere considerati.

Come già noto il parametro fondamentale per il calcolo delle necessità di parti di ricambio è MTBF o il suo reciproco, tasso di guasto. Per una ipotetica flotta media di N aeromobili è facile stimare il numero di ricambi, di un certo tipo, necessari per un periodo di tempo T come:

$$F = R \cdot K \cdot N \cdot T$$

dove:

- $R = n \cdot \lambda$ tiene conto che il pezzo in questione avente tasso di guasto, è presente in numero n sull'aeromobile
- K = è un semplice fattore di conversione dei tempi (potendo essere diverse unità di misura in cui sono espressi $1/\lambda = MTBF$ e T).

Evidentemente F rappresenta la velocità con cui si consumano i ricambi.

È chiaro però che la media raramente è costantemente rispettata, per cui in realtà, nell'unità di tempo, si verificheranno a volte un numero maggiore (rispetto a F) di avarie, a volte un numero minore.

Per poter far fronte ai casi in cui avvengono più avarie di quelle mediamente prevedibili sarà necessario prevedere, nell'unità di tempo, un numero di ricambi F_l Con $F_l > F$.

Se si assume che la distribuzione delle avarie nel tempo sia in accordo con la distribuzione di Poisson, possiamo determinare il fattore di sicurezza in termini di livello di protezione, ossia predeterminando le probabilità che la parte in esame sia disponibile quando richiesta.

Si ha quindi che la formula che consente di calcolare la quantità della parte/unità in esame da immagazzinare, livello di sicurezza compreso, è data, in termini di deviazioni standard, dalla seguente:

$$F_l = R \cdot K \cdot N \cdot T + A\sqrt{R \cdot K \cdot N \cdot T}$$

dove A rappresenta il numero di deviazioni standard.

Il livello di protezione viene solitamente espresso in percentuale, normalmente impiegando i seguenti valori:

1. Livello di protezione del 75%: per tutte le parti ad alto costo e per quelle a bassa movimentazione.
2. Livello di protezione del 95%: per parti di basso valore onde evitare che un End-Item o LRU di altissimo costo sia inoperativo per problemi di indisponibilità (Stock-out) di parti di valore relativamente basso.
3. Livello di protezione del 99%: per tutte quelle parti estremamente critiche il cui valore ed i relativi costi di gestione, qualunque essi siano, sono di importanza secondaria rispetto alla disponibilità continua dell'End-Item (missili, armamenti etc.).
4. Livello di protezione dell'85%: per tutte quelle parti/unità che non ricadono nei precedenti tre casi

È doveroso fare alcune considerazioni sul periodo di tempo T : può rappresentare il tempo puro di produzione oppure il tempo totale dell'approvvigionamento e più precisamente da quando nasce l'esigenza di avere una parte disponibile fino a quando lo è fisicamente. T assume ricorsivamente diversi valori in modo da poter effettuare eventuali interventi correttivi su tutto o su una parte del processo.

Avremo quindi che la quantità totale da immagazzinare è esprimibile come segue:

$$QT = F_1 + F_2$$

con: $F_2 = R \cdot K \cdot N \cdot T_2$

dove:

- T_2 = è il tempo necessario ad innescare le azioni amministrative per l'acquisizione della parte.

Se si considerano anche i tempi dedicati ai trasporti si ha:

$$QT = F_1 + F_2 + F_3$$

con: $F_3 = R \cdot K \cdot N \cdot T_3$

dove:

- T_3 = è il tempo necessario per il trasporto.

Se si desidera si può ottenere un frazionamento capillare dei tempi tale da avere:

$$QT = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n$$

Quanto finora esaminato può essere utilizzato per tutte quelle parti che vengono normalmente definite o classificate come consumabili o non-riparabili.

Per quanto riguarda i riparabili e cioè le LRU, altri parametri devono essere presi in considerazione e precisamente:

1. La capacità che ha l'azienda e l'ente preposto di riparare/revisionare le LRU in avaria.
2. Il tempo necessario ad effettuare la riparazione/revisione che può comprendere o meno i tempi morti amministrativi, tempi per trasporto etc.

Tenendo conto dei nuovi parametri si ha:

$$F_2 = R \cdot K \cdot N \cdot (TAT) (1 - P) + A \sqrt{R \cdot K \cdot N \cdot (TAT) (1 - P)}$$

dove:

- TAT = quantità di tempo necessaria per il ripristino dell'efficienza della LRU difettosa.
- P = è la capacità di riparazione/revisione della LRU difettosa (100%) da parte dell'installatore.
- $(1 - P)$ = è la capacità di riparazione/revisione delle LRU di acquisto la cui rimessa in efficienza (in un certo numero di casi) eccede la capacità/possibilità dell'installatore e viene demandata al prime Manufacturer (esempio generatori, radio, pompe etc.).

Infine un altro fattore che deve essere considerato è il rateo di scarto e cioè il numero delle LRU che vengono scartate in toto e devono essere reintegrate.

$$QT' = F'_2 + F'_3$$

con: $F'_3 = R \cdot K \cdot N \cdot U (TA)$

dove:

- U = è il rateo di scarto (100%).
- TA = tempo di approvvigionamento oppure di acquisto.

A conclusione di questa presentazione è doveroso richiamare alcuni concetti fin qui esposti ed aggregarli allo scopo di ridurre i costi. Le parti di ricambio, siano esse semplici o complesse, vengono di solito suddivise in varie classi a seconda dei livelli di costo, tale suddivisione consente, nella pratica di:

1. Assegnare diversi livelli di protezione (in termini di deviazioni standard) alle parti di ricambio appartenenti alle diverse classi a valore (basso, medi, alto).
2. Calcolare in modo oculato punto di riordino.
3. Usare diverse aliquote di distribuzione nel caso di magazzini decentrati, Dealers, Consignments etc.
4. Usare diversi criteri di approvvigionamento e/o produzione ricambi.
5. Usare diverse procedure di approvvigionamento per la classe ad alto valore.

In effetti ai fini della riduzione dei costi, si potrebbe pensare di ridurre i livelli di protezione e di conseguenza le scorte di sicurezza in modo tale da concentrarli presso un unico magazzino (nella gestione con più magazzini decentrati sul ed al di fuori del territorio nazionale) ed ottenere la stessa disponibilità ottimizzando così i tempi di rifornimento, di acquisto, di amministrazione e così via. Per ovvi motivi ai particolari di basso e bassissimo costo dovrà essere assegnato un livello di protezione più alto di quello assegnato alle altre classi. Un beneficio immediato si avrà poiché avendo eliminato il rischio di Stock-out per le parti di basso valore si potrà concentrare l'attenzione alle sole parti di alto costo attraverso una più oculata gestione.

5 LIFE CYCLE COST ANALYSIS

È stata più volte ricalcata l'importanza e la necessità di considerare i costi sin dalle prime fasi del processo progettuale. Come già citato, uno strumento essenziale è l'analisi Life Cycle Cost (LCCA) che viene svolta mediante l'impiego di modelli matematici la cui complessità varia in funzione di molti fattori, quali:

- L'obiettivo che si persegue;
- La fase dello sviluppo in cui viene utilizzato il modello;
- La disponibilità di dati relativi al progetto.

I modelli normalmente utilizzati possono essere suddivisi in due grandi categorie:

1. Modelli statistici che consentono previsioni dei costi in funzione delle caratteristiche fisiche e prestazionali del velivolo.
2. Modelli ingegneristici che consentono previsioni dei costi attraverso l'individuazione di tutte le componenti di costo coinvolte, di tutti i fattori che le generano e delle relazioni che intercorrono tra di esse.

Il primo tipo di modelli viene normalmente utilizzato durante le prime fasi del progetto, quando vengono definite le caratteristiche che dovrà avere il velivolo, i secondi, invece, vengono sviluppati nelle fasi successive, man mano che il progetto prende forma e vengono rese disponibili maggiori informazioni. Ed è proprio su questi ultimi modelli che si vuole mostrare particolare attenzione. Di seguito saranno descritti:

1. Un modello di tipo ingegneristico ed il suo impiego in un problema di ottimizzazione del LCC.
2. Un programma di affidabilità e manutenibilità orientato alla riduzione dei costi di manutenzione.

5.1 Modello di tipo Ingegnistico

L'utilizzo di dispositivi elettronici complessi per il controllo dei sistemi militari e civili, comporta la necessità di avere, oltre a elevati livelli di continuità del servizio, il bisogno di elevati livelli di esercitabilità degli stessi, determinando come conseguenza immediata una forte integrazione tra caratteristiche di affidabilità e manutenibilità delle macchine (configurazione, livelli di diagnostica, tecnologie utilizzate, qualità dei componenti ecc.) e quelle derivanti dalla gestione delle stesse (supporti logistici, tempi di intervento, preparazione del personale, ricambi ecc.).

Tale integrazione diventa ancora più evidente quando se ne analizzano le implicazioni economiche. Diversi studi hanno evidenziato come, tramite una corretta analisi LCCA e quindi grazie alla scelta di sistemi ed apparati più affidabili, pur presentando costi iniziali più elevati, consentono nel loro arco temporale di utilizzo, ingenti risparmi nei costi operativi. L'affidabilità, la manutenibilità e la disponibilità tendono quindi ad essere viste come obiettivi da perseguire e da controllare in fase di progettazione.

5.1.1 LCC come Strumento di Decisione

Nelle varie fasi di progettazione di un sistema si verificano spesso situazioni in cui la complessità dei modelli affidabilistici, la numerosità dei parametri in gioco, i loro diversi gradi di criticità, i loro range di variabilità nonché i loro effetti differiti nel tempo, creano scenari complessi dove risulta impossibile qualunque decisione in termini di scelte di sistema, di tecnologie, di qualità iniziale dei

componenti, di ingegnerizzazione ecc. Fondamentale apporto in questi ambiti viene dalla analisi del Life Cycle Cost, che possiamo considerare suddiviso nelle tre categorie:

- Costi di sviluppo (Development Costs)
- Costi di investimento (Investment Costs)
- Costi Operativi (Operation Costs)

Tali costi che coprono tutta la vita degli item, dalla progettazione fino al loro ritiro dell'esercizio, interessano rispettivamente sia la figura del costruttore sia quella dell'utilizzatore. Risulta chiaro, quindi, nell'ottica di un'efficace minimizzazione dei costi, quanto sia necessario riferirsi ad un contesto del tutto generale, che superi quindi la tradizionale barriera Produttore-Cliente.

L'obiettivo fondamentale dunque, per un sistema, risulta essere sempre lo stesso: riuscire ad eseguire le funzioni per cui esso è stato progettato con un livello di disponibilità opportuno e un costo totale più basso.

5.1.2 Modello di Calcolo

Il modello di calcolo ha un'applicabilità generale ed è facilmente automatizzabile mediante l'ausilio di un calcolatore.

Partendo da un set di dati iniziali quali ad esempio le tecnologie disponibili, le strutture di sistema tecnicamente realizzabili, il calcolo si sviluppa compatibilmente con il vincolo di riferimento; ad esempio dal conseguimento di un prefissato obiettivo di disponibilità del sistema, attraverso i requisiti fondamentali: Affidabilità, Manutenibilità, Costi.

La struttura di un generico modello è costituita da programmi di calcolo descritti di seguito:

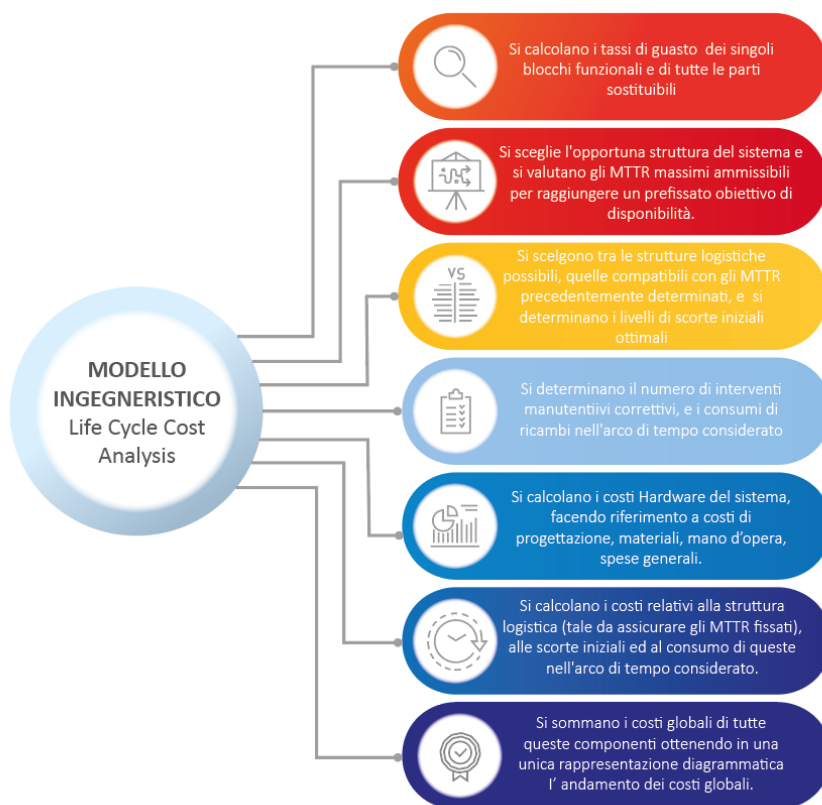


Figura 10 Flowchart modello ingegneristico

5.1.3 Considerazioni sul Modello.

Il modello di LCC presentato sopra è basato su dati (configurazione del Sistema, tipi e quantità di componenti, livelli di affidabilità degli stessi, criteri, strategie e di manutenzione ecc.) che vengono ottenuti per iterazione durante il procedimento di progettazione. È opportuno tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- L' approccio della ricerca di un valore "ottimale" di affidabilità è quello normalmente seguito dalle aziende USA ed Europee nelle quali al concetto di "qualità" è associato un concetto di "costo" della stessa.
- Il costo associato ad un guasto non può essere valutato esclusivamente in termini di ore/uomo e materiali spesi per rimediarvi ed in termini di mancato servizio: si devono contemplare anche altri costi, difficilmente quantificabili a priori come la "perdita di immagine" del produttore o dello stesso utilizzatore nei confronti dei suoi clienti.
- Il ciclo di vita di un prodotto potrà, se non intervengono evidenti problemi di obsolescenza tecnica, prolungarsi ben oltre quello previsto in progettazione (come ad esempio in campo aeronautico, velivoli civili progettati negli anni 50 pensati con una vita operativa di circa 20-25 anni, sono ancora oggi in funzione).

Queste poche osservazioni dovrebbero indurre ad assumere il valore di affidabilità coincidente con il minimo LCC inteso non come "ottimale" ma come "minimo accettabile".

In altre parole, occorre superare il concetto di affidabilità, o in generale *qualità = costo*, per sostituirlo con quello di qualità investimento, nella convinzione che il miglioramento della qualità deve essere perseguito in modo continuo e senza limiti.

5.2 Programma di Affidabilità e Manutenibilità per la riduzione dei costi di manutenzione

Da quanto sopra riportato è dunque chiaro che due dei requisiti di fondamentale importanza per un progetto che miri alla riduzione dei costi globali del ciclo di vita sono l'affidabilità e la manutenibilità. Attraverso una corretta scelta di tali due parametri è possibile la progettazione di un programma manutentivo, grazie al quale si possono ridurre al minimo la frequenza degli interventi manutentivi e la possibilità di ottenere una maggiore facilità di manutenzione.

Il programma così ottenuto può essere suddiviso in quattro fasi temporali:



Figura 11 Fasi LCCA

5.2.1 Prima Fase: Definizione dei Concetti e degli obiettivi

Lo svolgimento della prima fase temporale è da considerarsi contemporaneo agli studi di fattibilità ed alla definizione delle specifiche del velivolo rispettando i vincoli di sicurezza, affidabilità, manutenibilità e manutenzione.

Gli obiettivi posti a progetto sono stati suddivisi in due grandi categorie:

1. *Obiettivi operativi e di sicurezza*, aventi implicazioni di portare a termine con successo le missioni cui sarà sottoposto il velivolo e sulla capacità di salvaguardare l'integrità fisica dello stesso e del suo equipaggio.
2. *Obiettivi a carattere logistico* aventi implicazioni sui costi di mantenimento in servizio del velivolo.

Inoltre l'attività svolta per la definizione dei concetti permette di individuare precise caratteristiche per le quali generare dei requisiti di progetto (sicurezza, affidabilità di missione e affidabilità operativa)

Parallelamente alla definizione dei concetti e degli obiettivi di affidabilità possono essere definiti quelli del supporto logistico.

Le caratteristiche di tipo logistico riguardanti costi di manutenzione per cui è possibile porre obiettivi sono:

- MTBF (Mean Time Between Failures)
- MTTR (Mean Time To Repair)
- Numero medio di tecnici per operazioni di manutenzione
- Ore/ uomo di manutenzione per Ora di volo.

5.2.2 Seconda fase: controllo del progetto.

La seconda fase temporale è contemporanea all'attività di progettazione. L'analisi di affidabilità e sicurezza costituisce l'attività centrale della verifica di progetto. Tra i metodi tradizionali di analisi dell'affidabilità, la *FMECA* (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) è una delle più utilizzate, sia per la quantità di informazioni che permette di evidenziare con razionale classificazione in ordine alla esecuzione delle attività successive, sia per la scarsità di dati idonei a giustificare un approccio fondamentale statistico.

L'approccio da utilizzare è del tipo Bottom up. Le caratteristiche principali sono:

- Rigorosità e sistematicità nell'individuazione dei singoli modi di guasto e dei loro difetti.
- Orientamento all'Hardware (aspetto fisico) del sistema.
- Di natura induttiva.

La valutazione di criticità (Criticality Analysis) degli effetti dei guasti può essere sviluppata tenendo conto sia dei guasti e delle loro conseguenze sul velivolo, sia della probabilità che si verifichino.

Il livello di criticità può invece essere valutato in relazione alla probabilità ad esso associata e tenendo conto della classificazione dei rischi fornita dalla MIL-STD-882 e dai documenti JAR. 25—1309 (Joint Airworthiness Requirements) e TSS30 (Franco—British Standard). Questo tipo di analisi, effettuato sui principali sistemi del velivolo consente di:

- Fornire ai progettisti una più approfondita conoscenza degli impianti, individuandone le possibili aree di criticità.
- Verificare l'effettiva presenza delle ridondanze progettate.
- Individuare tutti i componenti i cui modi di guasto possono avere influenze negative sull'operatività e sulla sicurezza del velivolo.
- Fornire una base su cui successivamente sono stati sviluppati sia programmi di manutenzione preventiva, sia le procedure di manutenzione correttiva.
- Eseguire confronti tra diverse possibilità di configurazioni di progetto.

Il passo successivo dell'analisi di affidabilità sarà il suo utilizzo nello sviluppo preliminare dei programmi di manutenzione preventiva.

Questi programmi potrebbero essere sviluppati seguendo la metodologia analitica RCM e prendendo come riferimento il documento guida MSG-3.

Confrontando le previsioni di sicurezza, affidabilità operativa, affidabilità di missione, manutenibilità (ore/uomo di manutenzione per ora di volo MTTR) e MTBF logistico con gli obiettivi fissati si arriverebbe a far chiarezza sulle aree critiche del progetto ad innescare, quindi, le opportune modifiche.

5.2.3 Terza Fase: Verifica Sperimentale

La terza fase temporale è sviluppata parallelamente all'attività di prova dei prototipi.

Strumento fondamentale per lo svolgimento di questa fase è il sistema di rilevamento dati, le cui caratteristiche principali sono:

- Impiego di personale appositamente addestrato.
- Impiego di procedure semplici, tali da permettere un ritorno d'informazione rapido.
- Codificazione dei guasti, della fase di volo o dell'intervento di manutenzione durante il quale si è manifestato il guasto, degli effetti del guasto sulla missione in corso dell'operazione di ripristino eseguita, della eventuale azione svolta dall'equipaggio per ovviare temporaneamente al guasto, dei sintomi presentati dal guasto.

I dati rilevabili sono i seguenti:

- Ore di volo accumulate dal velivolo.
- Tempi di manutenzione correttiva (diagnosi, accesso, disassemblaggio, sostituzione, riassettaggio, controllo ed eventuale calibrazione).
- Tempi di manutenzione preventiva (accesso, disassemblaggio, ispezione o controllo etc.).
- Numero di tecnici impiegati nell'operazione di manutenzione.

A completamento dei dati sopra elencati sarà possibile raccogliere osservazioni relative alla manutenibilità (difficoltà di accesso a impianti e componenti, difficoltà di montaggio e smontaggio di parti, esigenze di attrezzature particolari etc.) da parte del personale di manutenzione e del Controllo Qualità.

Come per la seconda fase, attraverso un controllo continuo della "posizione" dei prototipi rispetto agli obiettivi di progetto, è possibile individuare le aree critiche del velivolo sia per quanto riguarda l'affidabilità sia per gli interventi di manutenzione, e quindi l'innescare delle azioni da svolgere per conseguire, o migliorare sui velivoli di serie, gli obiettivi di progetto.

5.2.4 Quarta Fase: Monitoring dei Velivoli in Servizio.

Attraverso il monitoraggio continuo del velivolo e grazie al sistema di valutazione sopra descritto si potranno ottenere dati riguardanti l'andamento nel tempo delle caratteristiche di affidabilità e manutenzione, acquisendo così ulteriori dati utili per le successive ottimizzazioni del programma di manutenzione preventiva.

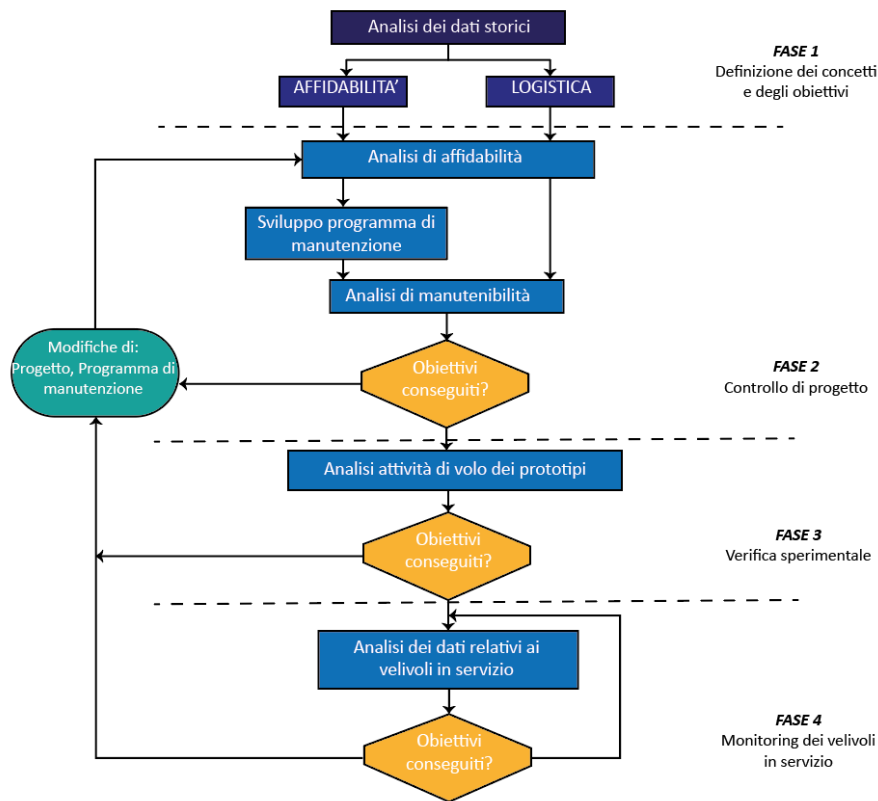


Figura 12 Flowchart fasi LCCA

5.3 In-Service Data Analysis (ISDA)

5.3.1 Generalità

La raccolta dei dati relativa alla fase operativa di un prodotto può essere ottenuta attraverso l'implementazione di un processo ISDA con l'obiettivo di effettuare diverse tipologie di analisi.

Il primo fondamentale passo è rappresentato dalla raccolta dei dati durante la fase operativa delle Flotte che saranno oggetto di studio, per la costruzione di un database contenente tutte le informazioni riguardanti l'impiego dei velivoli, unitamente a quelle concernenti l'avvenimento di determinati eventi (guasti, richieste di rimozioni, riparazioni) che hanno interessato gli item sotto osservazione.

Le principali fasi del processo ISDA sono:

- **Analisi Operativa:** analisi dell'impiego dei velivoli suddivisi in flotte.
- **Analisi di Affidabilità:** Calcolo dell'affidabilità delle flotte, dei velivoli e degli item in oggetto sulla base dei dati raccolti in servizio.
- **Calcolo URR (Trend Analysis):** calcolo della frequenza delle rimozioni non schedate e analisi del suo andamento nel tempo.

- **Selezione Top Unreliable Item:** analisi basata su parametri come l'**MTBUR** (Mean Time Between Unscheduled Removals).
- **Selezione Item critici:** analisi basata su parametri prestazionali di valutazione e su un Best Engineering Judgment.

L'ISDA si conclude quindi con un report contenente anche le azioni consigliate da intraprendere per poter ottenere un miglioramento dell'Affidabilità.

Si riportano in uno schema a blocchi le fasi della *In Service Data Analysis*.

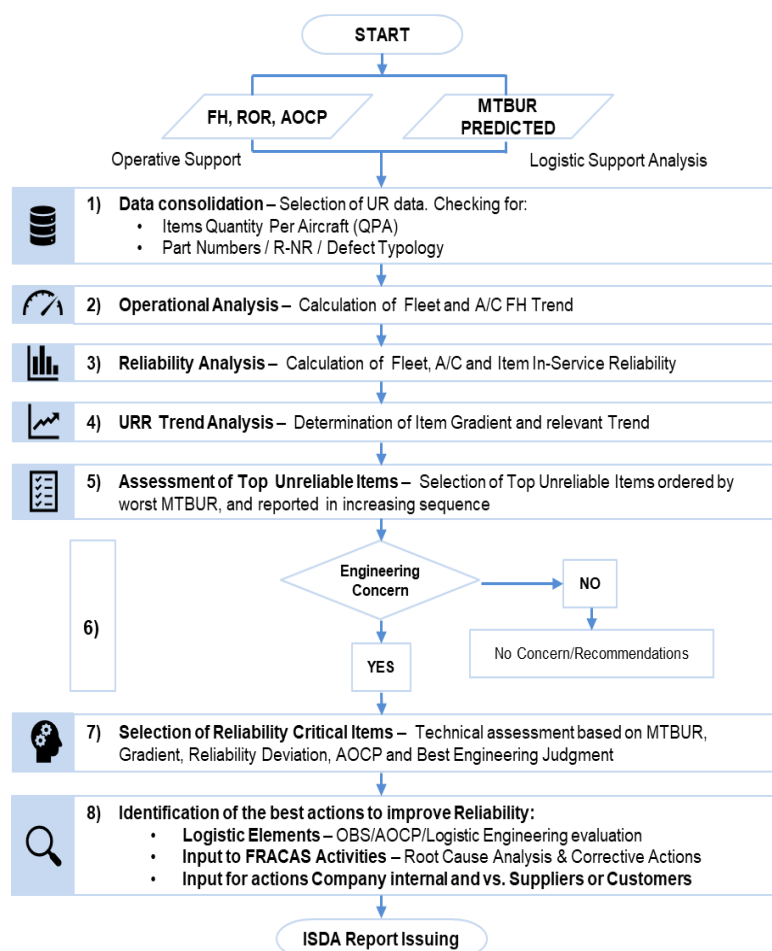


Figura 13 Flowchart ISDA

Nella fase di Assessment dei Top Unreliable Items il valore di MTBUR Predicted, solitamente assunto pari all'80% dell'MTBF di progetto, viene confrontato con i dati ricavati dal campo. La deviazione tra questi due valori rappresenta uno dei parametri prestazionali di valutazione che consente la scelta degli Item Critici.

I valori ricavati dall'ISDA, oltre a pilotare l'analisi FRACAS illustrata nel seguente paragrafo, permettono a chi svolge l'analisi LCCA di ricevere dati aggiornati dal campo per validare ed aggiornare i modelli da loro utilizzati nelle prime fasi di calcolo.

5.4 Failure Reporting Analysis & Corrective Action System (FRACAS)

5.4.1 Generalità

Per gli items individuati dall'ISDA, che si rivelano magari essere anche un aggravio in termini di costo nella LCCA, si procede con l'analisi FRACAS.

Il processo si configura come un loop chiuso mirato all'individuazione delle cause dei *failure* verificatisi e alla successiva individuazione e implementazione di azioni correttive in grado di ridurre o, nel migliore dei casi, azzerare la frequenza con cui si manifestano. Questo consente di incidere sull'LCC e sulla disponibilità dei velivoli non agendo sulle scorte disponibili ma sull'affidabilità reale in servizio degli equipaggiamenti analizzati.

L'analisi FRACAS è generalmente applicata limitatamente ad un gruppo ristretto di item classificati come i meno affidabili (*Critical Items*). Per l'individuazione di questi componenti è essenziale servirsi di dati ottenuti in servizio.

In quest'ottica sono evidenti i profondi legami esistenti tra ISDA e FRACAS: attraverso l'analisi dei dati in servizio si avrebbero a disposizione le informazioni per effettuare una cernita dell'intera popolazione di item che hanno subito dei *failure* in un certo periodo di monitoraggio, mentre con la messa in atto di azioni correttive si cerca di eliminare le criticità individuate.

Perché l'obiettivo dell'analisi FRACAS sia raggiunto è innanzi tutto essenziale che un *failure* sia correttamente individuato. Si parla più propriamente di *Failure Reporting*. Durante questa fase è essenziale la raccolta di dati relativi al guasto che si è verificato.

Una volta che i dati sono disponibili si procederà ad un'operazione di indagine circa le cause che lo hanno provocato. Questa fase è detta *Failure Analysis* e per facilitare il suo svolgimento è di vitale importanza l'avere a disposizione un Database storico contenente informazioni relative a tutti i *failure* osservati. Si verifica infatti che uno scostamento dalla normale operatività di un item o un sistema montato a bordo di un certo velivolo può trovare spiegazione grazie ai dati raccolti su velivoli simili.

Si giunge quindi alla fase di studio ed implementazione delle azioni correttive. Esse devono mirare ad impedire che un dato *failure* si manifesti nuovamente o quantomeno a ridurre la frequenza con cui si verifica. La messa in atto di tali azioni correttive deve quindi servire a produrre un miglioramento in termini di affidabilità del componente.

Non è però sufficiente limitarsi alla sola fase di implementazione. È infatti imperativo verificare che le azioni correttive prescelte producano effettivamente i risultati attesi. È questo il momento di chiusura del loop in quanto per dimostrarne l'efficacia si procederà ad un attento monitoraggio delle prestazioni in servizio.

Uno dei momenti più importanti del processo FRACAS è costituito dal cosiddetto *Failure Review Board*, ovvero un incontro cui tutte le parti interessate (Produttori, Fornitori, Clienti e Personale di altri Enti coinvolti nel processo) sono chiamate a partecipare. In tale incontro, da svolgere con cadenza periodica, sono discussi l'andamento dell'affidabilità degli item più critici nel tempo e le azioni correttive da implementare.

5.4.2 Tipologie di processo FRACAS e pianificazione

L'analisi FRACAS così come è stata descritta al paragrafo precedente ha un vastissimo campo di applicazione. Come tale è possibile individuare varie tipologie di processo:

- **FRACAS di produzione:** analisi svolta relativamente ai processi produttivi con l'obiettivo di individuare le cause della bassa affidabilità riscontrata dal prodotto in servizio. Tale applicazione del FRACAS si configura quindi come un affinamento della fase di produzione.
- **FRACAS dati in servizio:** analisi relativa alla fase operativa della vita del prodotto. Corrisponde al processo descritto al paragrafo precedente che mira a migliorare l'affidabilità implementando azioni correttive nei confronti dei *failure* verificatisi in servizio presso i Clienti.

Qualunque sia l'oggetto dell'analisi è comunque fondamentale che la sua applicazione sia preceduta da un'attenta pianificazione. Il **FRACAS Planning** consiste nella messa a punto di tutte le procedure da utilizzare per le fasi di *Failure Reporting*, *Failure Analysis* ed implementazione delle azioni correttive. Molto importante è anche la programmazione del processo di feedback a tutte le parti interessate relativo alle modifiche introdotte a livello di progetto, di produzione o relative alle metodologie di test.

Nel *FRACAS Plan* andranno anche inseriti le modalità di Inserimento/Estrazione di dati dal Database FRACAS. Se infatti è essenziale che tale banca dati sia accessibile da tutti gli addetti ai lavori, la sua modifica deve essere autorizzata e limitata ai soli membri qualificati del personale.

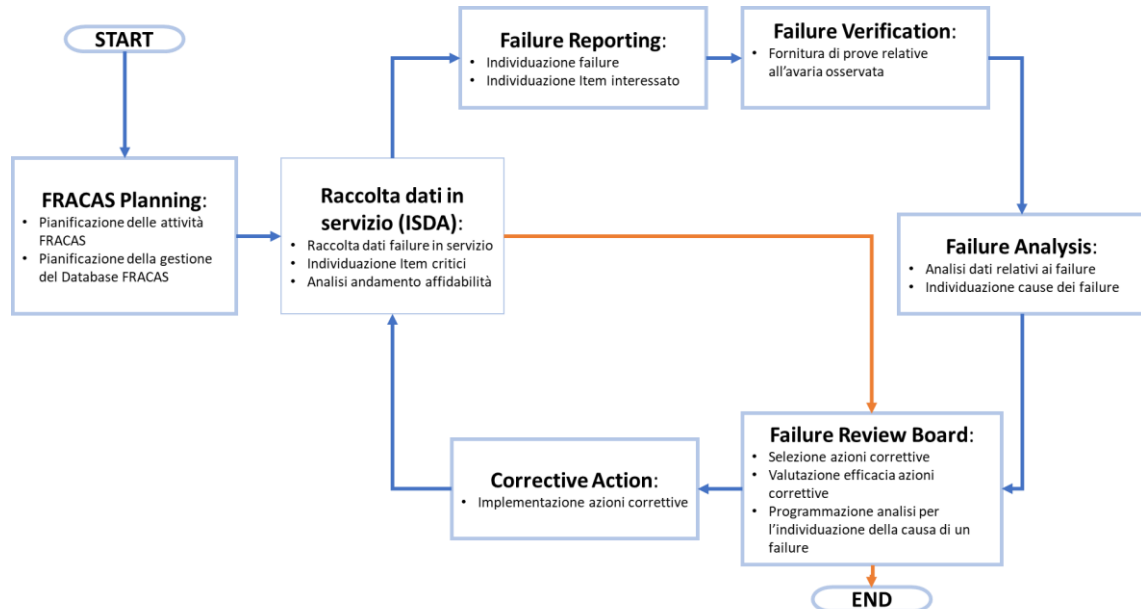


Figura 14 Flowchart FRACAS

6 MANUTENZIONE PREDITTIVA

6.1 Definizione Prognostica

Negli ultimi anni l'idea di manutenzione si è evoluta fortemente in ogni settore dell'industria. Accanto ai metodi tradizionali (manutenzione periodica e correttiva) si è sviluppato un nuovo modo di concepire l'intervento manutentivo: **la diagnostica predittiva o prognostica**. La manutenzione periodica è effettuata a partire dalla registrazione storica dei tempi fra guasti successivi, tramite la pianificazione di interventi cadenzati di manutenzione, con lo scopo di ridurre al minimo i guasti.

La manutenzione correttiva interviene a guasto avvenuto. I tempi di intervento della manutenzione correttiva sono influenzati dai tempi di arrivo dell'addetto, dai tempi di smontaggio, dai tempi di diagnosi e dalla disponibilità dei ricambi. A ciò deve essere aggiunto il costo derivante dal fermo macchina.

La diagnostica predittiva rappresenta una strategia alternativa e innovativa. Lo stesso termine, prognostica sta ad indicare l'uso integrato di diagnosi e prognosi: la diagnosi si riferisce alla condizione passata e corrente del sistema e si basa sulle anomalie osservate, mentre la prognosi è una valutazione del suo stato futuro.

Lo scopo degli algoritmi di prognostica è stimare la **vita residua** del sistema a partire da un insieme di segnali diretti ed indiretti rilevati a cadenza periodica, segnalando condizioni di mal funzionamento del sistema, identificando funzionalità anomale e attuando le azioni correttive più appropriate, con lo scopo di garantire la massima disponibilità del sistema con il minor dispendio di tempo e denaro.

L'approccio alla diagnostica predittiva segue il seguente flusso metodologico:



Figura 15 Flowchart Diagnostica Predittiva

Mediante l'utilizzo di metodologie statistiche si cerca di identificare un algoritmo predittivo (modello matematico) in grado di segnalare eventuali situazioni anomale del componente. Il primo passo consiste dunque nella scelta a priori di grandezze che variano in dipendenza di parametri interni o esterni dalle quali sia possibile ricavare lo stato di efficienza del sistema; tale identificazione non risulta essere immediata, pertanto occorre ipotizzare un modello concettuale partendo da una conoscenza fisica del sistema in esame. Una corretta definizione di tale modello minimizza il rischio di tralasciare alcuni parametri significativi e permette di migliorare la conoscenza del sistema aggiungendo dove necessari eventuali sensori.

Il secondo passo consiste nell'analisi statistica dei dati acquisiti sul campo; in primo luogo si effettua un'analisi preliminare (per eliminare eventuali errori di acquisizione, incoerenze nei dati e per individuare correlazioni tra le quantità che compaiono nel modello concettuale). Si passa quindi all'identificazione di indicatori predittivi che riassumono le informazioni ottenute dall'analisi precedente.

Per mettere in evidenza il legame tra gli indicatori predittivi e i fattori che influenzano il sistema si stima un modello quantitativo. Tale modello permette di determinare con maggior robustezza eventuali soglie di allarme che vengono calibrate considerando sia le condizioni di normale utilizzo del sistema sia le condizioni di guasto.

Una corretta scelta delle soglie di allarme permette di identificare le differenti situazioni di guasto (degrado progressivo del sistema, rotture improvvise di componenti o semplicemente falsi allarmi), segnalando in anticipo la necessità di un intervento manutentivo, ottimizzando gli interventi di manutenzione e riducendo i fermi-macchina, fornendo a un costo minore una maggiore qualità del servizio.

6.2 Linee evolutive

Uno degli aspetti più rilevanti dei moderni aeromobili è la crescente rilevanza della sistemistica di bordo, ossia del complesso di dispositivi installati sulla struttura del velivolo. Fanno parte della sistemistica di bordo i comandi di volo, il carrello di atterraggio, comprensivo di freni ruote e sterzo per la mobilità a terra, il condizionamento d'aria, la protezione dal ghiaccio, le luci e oggi di grandissima rilevanza, l'elettronica di bordo o avionica.

Un sistema avionico è una entità completa progettata per svolgere una serie di funzioni che soddisfano i requisiti di missione, operativi e di costo del ciclo di vita del sistema.

Per quanto riguarda gli sviluppi tecnologici in ambito militare aeronautico nel corso degli anni si è passati da un'ottica militare ad un'ottica civile. In pratica in ambito militare il progetto di un velivolo si costruiva ex novo da cima a fondo, riprogettando ogni singolo sistema. Per quanto riguarda invece l'industria aeronautica rivolta al civile, si è sempre proceduto ad assemblare o ad inglobare all'interno di sistemi da progettare, componenti hardware (costituenti veri e propri sistemi o sottosistemi) o software, già progettati e realizzati, quindi subito reperibili sul mercato (la cosiddetta COTS = Commercial Off-the-Shelf). Un prodotto COTS è un prodotto che può essere adoperato in alternativa a componenti sviluppati internamente all'azienda. Nell'ambito di progetti di sviluppo hardware e software, questa pratica è spesso una strategia volta a contenere i costi di sviluppo e manutenzione.

Il beneficio maggiormente atteso dell'utilizzo di dall'avionica modulare, sia per l'avionica militare che per l'avionica civile è un costo del ciclo di vita (LCC) ridotto grazie a:

- Riduzione, o addirittura eliminazione del secondo e terzo livello di manutenzione
- Riduzione della diversità dei tipi di ricambi necessari
- Aumento dell'affidabilità
- Aumento manutenibilità
- Diminuzione del peso
- Riduzione dei costi di modulo grazie ai numeri che derivano dalle parti comuni

Essendosi evoluta quindi questa visione, la tendenza è quella di rivoluzionare il sistema manutentivo alla base del velivolo. Si pensa infatti ad un progressivo abbandono del secondo e terzo livello di assistenza (quello sugli LRU) in quanto risulta meno oneroso, dal punto di vista dei costi, sostituire direttamente il pezzo con uno nuovo piuttosto che ripararlo. Visto lo sviluppo della tecnologia l'idea futura è quella di dotare il velivolo con una rete di sensori interconnessi che rilevano i **parametri vitali del sistema** attraverso correlazioni tra più segnali per poi. I dati raccolti poi, durante il volo o una volta atterrato l'aereo, sono scaricati, elaborati ed eventualmente confrontati con i dati storici, in modo da ottenere una più rapida comprensione del guasto, e quindi delle tecniche manutentive più idonee da attuare.

Questa idea di prognostica offre i seguenti vantaggi:

1. A bordo devono essere installati soltanto un delta di sensori aggiuntivi rispetto a quelli già previsti.
2. Non si appesantisce il velivolo con sistemi di elaborazione o altro e quindi il peso resta contenuto.
3. Eseguendo l'elaborazione a terra si può disporre di sistemi hardware e software decisamente superiori rispetto a quelli installabili su un velivolo.
4. La prognostica viene svolta solo a terra, ma se necessario con dati già registrati e trasmessi durante il volo.
5. La safety non viene intaccata, perché a bordo del velivolo vengono solo aggiunte funzionalità di raccolta dati.

Un sistema che si pone come obiettivo i requisiti sopra scritti è l'**Health Management System (HMS)**. Esso è capace:

- Di monitorare lo stato di vita dei componenti sotto osservazione;
- Di generare warning nel caso di potenziali avarie, per far sì che sia possibile preparare determinate azioni manutentive in anticipo.

Un'ulteriore tendenza del settore aeronautico è lo sviluppo di velivoli All electric. Di questi gli esempi più innovativi sono i cosiddetti UAV (Unmanned Air Vehicle), cioè veicolo aereo senza pilota a bordo. Questo tipo di mezzi possono essere completamente automatici (cioè seguire un profilo di volo pre-programmato) oppure possono essere teleguidati a distanza da una stazione fissa o mobile.

Proprio per questo motivo assume particolar importanza l'area sensoristica che dovrà occuparsi di controllare il motore (es. monitorare parametri fondamentali quali temperatura e numero dei giri), APU e attuatori (cioè tutti i trasduttori capaci di trasformare segnali di input in movimento, come ad es. motori elettrici. pistoni idraulici, etc.). I sensori dovranno essere il più leggeri possibile,

di piccole dimensioni ma nel contempo robusti per non incidere sul peso dell'apparecchiatura, avere elevata precisione, ripetibilità e affidabilità.

6.3 Diagnostica vs Prognostica

Un'altra tendenza del settore è il passaggio dalla semplice implementazione della diagnostica del velivolo all'implementazione del sistema di prognostica. Anche se strettamente legate, bisogna fare molta attenzione a non confondere la differenza che sussiste tra le due:

- **La diagnostica:** si riferisce ad una condizione passata e attuale del sistema, è una tecnica di monitoraggio che acquisisce informazioni basandosi sulle anomalie osservate. Essa ha lo scopo di mettere in luce eventuali errori del sistema, cercando di capire perché e da dove è partito l'errore.
- **La prognostica:** è una tecnica di monitoraggio avanzato, che acquisisce tutte le informazioni possibili sullo stato di salute del sistema e dei processi, al fine di individuare sul nascere i difetti, seguirne la loro evoluzione nel tempo e programmare con congruo anticipo e flessibilità le necessarie azioni correttive da effettuarsi solo quando strettamente necessarie. Tutto ciò viene fatto valutando la vita residua dei componenti del sistema.

6.3.1 Telemetria

Una delle tecnologie più all'avanguardia, che potrebbe migliorare il sistema prognostico facendo pervenire i dati da esso rilevati in maniera più tempestiva, è senza dubbio la telemetria.

La Telemetria (parola che deriva dalle radici greche tele = lontano, e metron = misura) è una tecnologia informatica che permette la misurazione e la registrazione di informazioni di interesse, al progettista di sistema o all'operatore che sta agendo sul sistema stesso.

I sensori inviano i dati ad una centralina, dalla quale poi i dati vengono scaricati su di un computer per essere successivamente analizzati ed elaborati al fine di apportare le dovute correzioni al sistema in esame. Questa tecnica permette di conoscere il comportamento del sistema in ogni situazione, accelerare la messa a punto, mettere in luce eventuali errori (che non sarebbero visibili in altro modo), evitarne il ripetersi e correggere rapidamente qualsiasi tipo di problema. La telemetria si riferisce tipicamente alla comunicazione wireless (ad esempio l'uso di un sistema a radiofrequenza).

6.3.2 Predizioni

Le apparecchiature elettroniche non seguono la curva di distribuzione guasti riportata nel capitolo 2, ma presentano un andamento costante durante tutto il ciclo di vita. A causa di quest'andamento, è impossibile prevedere il guasto, perché quest'ultimo si presenta in maniera casuale e improvvisa. Per cercare di prevenire un guasto si attuano politiche di Fault Tolerance, vale a dire si cerca di limitare le conseguenze del guasto, ad esempio attraverso una ridondanza effettiva o funzionale (quest'ultima è meno costosa e comporta un degrado tollerabile della prestazione richiesta).

Per effettuare un lavoro di predizione di failure, bisogna costruire un modello di vita accelerato del componente, che è funzione delle condizioni operative e dello stress a cui è sottoposto il componente stesso. Per modello di vita accelerato si intende un modello di comportamento del sistema che permette di predire una failure attraverso il monitoraggio operativo o attraverso dei test, rivolti principalmente alle condizioni operative e di stress ambientale a cui esso è sottoposto.

Quando una failure è osservata, appropriate azioni correttive possono essere prese in esame per eliminarne l'origine.

Tutti questi test si basano sulla teoria della velocità di processo, la quale è generalmente descritta da una dipendenza esponenziale dai parametri di stress e ha come obiettivo quello di arrivare a determinare la degradazione di una particolare caratteristica di vita a causa degli stress applicati (o fattori di accelerazione). Quando il tempo di osservazione non è abbastanza lungo per una confidenza sufficiente, i test di temperatura accelerati diventano un prezioso tool per estrapolare valori necessari al calcolo del failure rate e dell'MTBF.

6.4 Le tecnologie per la manutenzione su condizione

Il Condition Monitoring, quale strumento indispensabile per l'impostazione di una strategia gestionale on condition, rappresenta il complesso delle metodologie e delle tecnologie finalizzate alla valutazione delle condizioni attuali di un assegnato sistema. Tali tecniche spaziano dall'uso di complesse strumentazioni computerizzate, allo sfruttamento della sensibilità umana, in modo da prevenire i guasti e da mettere in atto la manutenzione solo in presenza di un'avaria potenziale e quando risulti più conveniente in base al programma di produzione.

Si tratta, in altri termini, di effettuare misurazioni comparative, periodiche o in modalità continua, dei parametri che rappresentano le condizioni del componente o del sistema oggetto dell'analisi, permettendo così di valutarne la situazione corrente e l'andamento futuro di un suo possibile deterioramento. Le tecniche di monitoraggio più utilizzate per i sistemi meccanico-industriali possono essere classificate nei seguenti tipi fondamentali:

- monitoraggio visivo
- monitoraggio della performance
- monitoraggio del rumore e delle vibrazioni
- monitoraggio del particolato da usura
- monitoraggio del calore.

6.4.1 Gli sviluppi nel Condition Monitoring

I progressi compiuti nel campo dell'**IT** (Information Technology, cioè il modo in cui vengono raccolte, registrate, elaborate e usate le varie informazioni) permettono oggi un'acquisizione di una moltitudine di dati in tempo reale ed un'analisi di questi (BIG DATA), pressoché contemporanea al processo produttivo, consentendo l'implementazione di tecniche di Condition Monitoring in passato ritenute solo teoricamente percorribili.

Allo stesso tempo l'IT rende possibile la progettazione di sistemi di produzione avanzati, che fanno uso di macchine intelligenti per garantire un maggior livello d'automazione. L'IT rende possibile individuare l'informazione, decifrarla, trasmetterla, riceverla, immagazzinarla, interpretarla e promuovere, conseguentemente, azioni appropriate sul sistema. In teoria, tutte queste attività dovrebbero essere svolte automaticamente, sulla base della conoscenza delle condizioni correnti in tempo reale. Ciò implica l'utilizzo di processi informatici in tempo reale, di una rapida interpretazione dei dati e l'adozione di un processo logico-decisionale automatico.

Oggi lo stato dell'arte, tramite metodologie di **controllo adattivo**, consente un aumento del tasso di utilizzo dei macchinari, della qualità dei componenti e della vita del sistema, ed una riduzione del costo del lavoro e dello spazio richiesto.

Il **Controllo Adattivo** (AC) è una tecnica che permette, ad un sistema equipaggiato di sensori, di individuare un cambiamento nell'ambiente e, nel caso in cui tale variazione è sfavorevole, di intraprendere automaticamente delle azioni correttive, in modo da ottimizzare il sistema sotto controllo secondo un dato criterio. In base a questa definizione è possibile classificare i sistemi di controllo adattivo in due tipologie principali:

- **Technological Adaptive Control** che a sua volta contiene due distinte tipologie di sistema:
 - **Adaptive Control of Constraints**, tecnica che mira ad ottenere lo svolgimento in sicurezza delle operazioni di sistema, nel rispetto di vincoli fisici correlati alla macchina;
 - **Adaptive Control of Optimization**, tecnica che mira ad ottimizzare l'economicità dei criteri di produzione;
- **Geometrical Adaptive Control**, orientata al prodotto, ha lo scopo di perfezionare la conformità dei componenti alle specifiche, tramite continui aggiustamenti della posizione dei sistemi in funzione.

Con la tecnologia odierna, si possono combinare le informazioni provenienti da diverse sorgenti di dati, per dar luogo a quello che si potrebbe chiamare un sensore intelligente. Questi sensori possiedono anche la capacità di valutare, in un certo qual modo, i dati in ingresso, così da poter, ad esempio, amplificare il segnale oltre il rumore di fondo, filtrarlo o combinarlo con altri segnali provenienti da fonti diverse.

6.5 Testabilità e Prognostica

Particolare rilievo assume, nell'ottica gestionale e manutentiva, il concetto di Testabilità del sistema: attitudine d'un sistema/apparato a consentire ai mezzi di autodiagnosi interni, o a strumentazione esterna adeguata, di verificarne la funzionalità e di diagnosticarne le avarie. Questo parametro logistico è oggetto di attenzione già da tempo e per esso sono state definite numerose figure di merito, al fine di valutare la bontà di un sistema di autodiagnostica o di stimare quanto un apparato sia testabile dall'esterno.

La Testabilità intrinseca del sistema, influenzando in modo notevole il tempo ripristino delle condizioni operative, costituisce uno dei parametri fondamentali che determinano il valore medio dei costi di manutenzione.

I requisiti di testabilità in questione sono diventati sempre più stringenti negli ultimi anni: essi si differenziano a seconda dell'apparecchiatura, ma hanno in comune alcuni parametri che servono a valutare la rispondenza dei dispositivi di test alle richieste contrattuali. Si tratta di Figure di Merito (FOM) il cui valore può essere stimato attraverso dettagliate analisi logistiche che, partendo dai dati progettuali, conducono, mediante metodologie perfettamente definite dalle normative, alla determinazione del parametro richiesto.

Prima di elencare le figure di merito più spesso richieste contrattualmente, è bene chiarire il significato di alcuni termini:

- **Built-in-Test (BIT)**: la capacità interna di un sistema di individuare ed isolare un'avaria: comprende il Built In Test Equipment (BITE), ovvero l'insieme dei programmi del software, dei circuiti di test, dei pannelli per la manutenzione, degli indicatori, etc., che concorrono a formare il sistema interno di diagnostica, costituito da numerosi sensori che hanno il compito di segnalare eventuali guasti.

- **External-Test-Equipment (ETE):** di cui fanno parte gli Automatic Test Equipment (ATE) e rappresentano dispositivi, esterni all'apparato, (per esempio un banco di prova) preposti all'individuazione e isolamento dell'avaria.

6.5.1 La gestione della Testabilità

Dopo aver definito le figure di merito che definiscono la Testabilità di un sistema partendo dai requisiti concordati con il cliente, la fase successiva implica un'attività di allocazione che consiste nel determinare le specifiche di manutenibilità dei componenti dell'apparato. Tale attività consiste nel distribuire, in modo logico ed in base a criteri di fattibilità economica e tecnologica, le esigenze di testabilità del sistema. L'allocazione della testabilità deve comunque essere preceduta dalla allocazione di affidabilità e da un'analisi delle funzioni, in modo tale da poter assegnare maggiori risorse di diagnostica ai guasti più probabili ed a quelli più critici.

Ai fini della testabilità sono di importanza rilevante le seguenti analisi:

- **Analisi di Testabilità:** l'analisi della capacità dei sistemi di diagnostica interni (BITE) ed esterni (ATE). Vengono evidenziate le interdipendenze e le limitazioni dei vari mezzi di diagnostica ai vari livelli gerarchici del sistema.
- **Analisi del BITE:** come sopra ma con un dettaglio maggiore per quanto riguarda la valutazione dei dispositivi e degli algoritmi relativi alle varie figure di merito.
- **Analisi dei Modi di Guasto e degli Effetti (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA):** si analizzano gli effetti, classificati in base ai diversi modi con cui i guasti possono presentarsi su ogni componente, in modo da determinare la probabilità che si verifichino certe categorie di guasto, soprattutto la categoria dei guasti critici. Si tratta di un'analisi bottom-up che parte cioè dai componenti e dai loro modi di guasto per analizzare, infine, l'effetto sulle funzioni del sistema, permettendo di prevenire e limitare fenomeni di propagazione dei guasti stessi.
- **Analisi dell'Abero dei Guasti (Fault Tree Analysis - FTA):** analisi top-down che, partendo dalle funzioni principali che il sistema deve espletare, permette di costruire l'albero degli item fisici i quali, interconnessi tra loro, contribuiscono a svolgere la funzione primaria sotto esame.
- **Catalogo dei Guasti (Fault Catalogue):** documento base in cui sono elencate, per ciascun item, almeno il 95% di tutte le possibili modalità di guasto (corto-circuito, fuori-tolleranza, contatto intermittente, assenza di segnale, etc.) e la loro probabilità di occorrenza
- **Dimostrazioni:** oltre alle analisi sulla carta fin qui descritte, il cliente in genere può imporre altre due categorie di prove della rispondenza dell'apparato alle figure di merito della Testabilità:
 - dimostrazioni in fase di accettazione
 - dimostrazioni in fase di in - service

6.5.2 La gestione della Prognostica

Le discipline di prognostica e testabilità si rivolgono verso quei componenti che hanno vita limitata, vale a dire che sono caratterizzati da un tasso di guasto con andamento crescente nel tempo. Generalmente si tratta di dispositivi meccanici (turbine, pompe, motori, etc.) o elettromeccanici (motori elettrici, interruttori, condensatori elettronici, etc.), ma talvolta anche di dispositivi elettronici e in definitiva di tutti quei componenti in cui vi è un processo di degrado graduale, fenomeni d'usura, di stress meccanico o, comunque eventi di avaria legati a fenomeni di deterioramento a catena.

La Prognostica rappresenta una generale tendenza verso la manutenzione on condition: si sostituisce tutto ciò che si rompe o che in qualche modo, cioè tramite opportuni sensori, rende evidente l'avvicinamento a una situazione di malfunzionamento. Essa, in altri termini, si applica solo dove esiste una qualche forma di preavviso per un guasto imminente.

Tutto ciò ha ovviamente un costo, che può risultare conveniente sostenere quando le conseguenze di un'avaria siano abbastanza gravi in termini di danno arrecato a persone o cose, e comunque in presenza di guasti che comportano l'impossibilità di completare una determinata missione.

6.6 L'implementazione della Prognostica

La fase iniziale dell'implementazione della Prognostica di un sistema consiste in un'analisi preliminare mirante a identificare gli LRU critici per la missione. Successivamente, occorre stabilire una scala di priorità basata sulle frequenze di guasto tipiche dei vari item e sulla loro idoneità ad essere oggetto di raccolta di dati utili.

Per esempio, le avarie che si verificano su dispositivi meccanici o idraulici bene si prestano ad essere previste attraverso un monitoraggio ed un'analisi attenta dei dati disponibili rilevati lungo un certo arco di tempo. Tali dispositivi, sottoposti alle procedure diagnostiche, possono dunque continuare ad operare normalmente per un certo periodo, anche se severamente sollecitati. Molto più difficile risulta l'implementazione della Prognostica su componenti elettrici/elettronici, caratterizzati, come detto, da guasti subitanei e casuali, che si presentano nel momento in cui una particolare caratteristica, per esempio la tensione elettrica, supera un certo valore di soglia. Stabilire criteri oggettivamente validi per la determinazione di tale soglia è impresa quanto mai ardua, poiché essa viene raggiunta improvvisamente e senza alcun apparente degrado progressivo della prestazione.

Gli LRU con vita limitata e/o con i più alti valori di frequenza di guasto sono i candidati prioritari all'implementazione della Prognostica, a causa del forte impatto sulla disponibilità operativa. Attraverso il monitoraggio e quindi all'immagazzinamento dei dati relativi all'andamento dei parametri vitali tramite l'utilizzo di appositi sensori durante un congruo intervallo di tempo, si può passare allo sviluppo di un software adatto alla determinazione, per ciascuna caratteristica, dei valori di soglia, raggiunti i quali si avvia un processo che conduce al guasto. Nel momento in cui questi valori vengono superati, il Sistema di Prognostica può notificare la presenza di un guasto incipiente all'operatore responsabile, programmando inoltre una sostituzione del pezzo alla prima occasione.

Quest'ultima attività è solo una tra quelle legate alla gestione della Prognostica, in analogia con quanto detto per la Testabilità: anche in questo caso, cioè, si dovranno approntare una serie di analisi logistiche che favoriscano una corretta allocazione delle esigenze di Prognostica sul sistema.

6.6.1 Il processo di progettazione della Prognostica

Da quanto si è visto, si comprende il livello di complessità di un Sistema di Prognostica che sia in grado di svolgere anche solo parte delle funzioni indicate, soprattutto se si dà il giusto peso al fattore tempo: infatti, una segnalazione di guasto imminente ha tanto più valore quanto più essa è tempestiva, lasciando il maggiore intervallo di tempo possibile per effettuare gli interventi del caso. Molti, però, sono i fattori che intervengono a rendere difficile tale passaggio. La grande quantità di dati che i sistemi sono in grado, oggi, di mettere a disposizione del manutentore, per certi versi

ostacolano e, a volte, paralizzano lo svolgimento della diagnosi, per le difficoltà interpretative e per l'ambiguità con cui vengono esplicitati i meccanismi di causa-effetto essenziali alla corretta valutazione dei fenomeni.

L'interpretazione della diagnostica (spesso on-board) deve essere affidata a specialisti, il che comporta una minore tempestività di intervento, dovuta sia all'azione contemporanea di diverse figure professionali, sia alla necessità di impegnare addetti di professionalità specifiche, ammesso che siano disponibili. Tale situazione di incertezza è resa ulteriormente drammatica allorché i dati diagnostici vengano rilevati con continuità (monitoring o controllo continuo della condizione) e si pone l'esigenza di isolare le poche informazioni importanti dalle molte non significative.

In questo panorama, un ruolo fondamentale può giocarlo un **Sistema Intelligente**, più o meno integrato con un sistema informativo di manutenzione, allo scopo di migliorare l'efficacia della diagnosi tecnica, sia consentendo una maggiore interattività con l'utente, sia fornendo un supporto attivo per la rapida individuazione dei guasti.

Le prestazioni degli attuali sistemi informativi sono limitate dalla struttura in cui questi sono inseriti, all'interno dei tradizionali sistemi per l'elaborazione dei dati (computer, minicomputer). Manca, infatti, nella logica procedurale dei calcolatori tradizionali, una struttura che filtri le informazioni e le riproponga eliminando le ridondanze e i casi banali, consentendo al manutentore di concentrarsi sui casi più significativi. Per questo è importante che il manutentore stesso interagisca con strumenti intelligenti in grado di sviscerare almeno in parte la complessità dei problemi, e di offrire sui fenomeni in esame, oltre che una raccolta organizzata di informazioni, anche valutazioni effettive sullo stato dei sistemi.

La diffusione dei Sistemi Intelligenti è ancora abbastanza limitata e riguarda solo il 2-3% delle applicazioni, tra l'altro prevalentemente in campo industriale manifatturiero. Questo perché, tra l'altro, i sistemi intelligenti attualmente realizzati per la manutenzione, sono altamente specializzati e orientati a risolvere un particolare problema. Non si prestano, quindi, ad un uso generalizzato di caccia ai difetti sulla base di informazioni introdotte dal manutentore con l'ausilio di un modello preesistente.

I recenti studi e progressi anche in questo settore aprono prospettive del tutto nuove. Basti pensare che, fino a qualche anno fa, i sistemi intelligenti erano ancora considerati troppo lenti, richiedendo tempi di risposta rilevanti per la soluzione dei quesiti. Si trattava, inoltre, di apparati generosamente dimensionati, che si adattavano solo al funzionamento con macchine dedicate o con grandi elaboratori: ciò richiedeva un costo elevato sia in termini di hardware sia di software. Oggi, invece, la diffusione dei personal computer di moderna concezione rende queste problematiche via via sempre meno pressanti.

6.6.2 Sistemi Intelligenti

Un Sistema Intelligente è un dispositivo artificiale che formula un'ipotesi plausibile su una probabile causa e successivamente la verifica. Ci si muove, quindi, utilizzando modelli di inferenza Bayesiana secondo cui, appunto, si parte da una situazione ipotizzata (per esempio una distribuzione dei guasti) per poi modificarla in base alle conoscenze acquisite operativamente.

Le procedure di ricerca dei guasti seguono la medesima logica: si osserva che cosa non funziona, lo si analizza, si valuta la plausibile causa, la si verifica e si itera il ragionamento finché non si trova la causa del malfunzionamento. Successivamente si rimuove la causa individuata e si verifica che il

sintomo sia scomparso. Si tratta, in sostanza, di un processo di ricerca delle cause a partire dagli effetti definito tecnicamente *backward chaining* (concatenamento all'indietro): concatenamento, cioè, di fatti (misure e controlli) per risalire alle cause (danneggiamenti, stato di degradazione) e consigliare sul da farsi.

L'analisi delle cause di guasto trae fondamento dalla seguente considerazione: non solo i guasti sono circoscritti ad un numero limitato di componenti, ma sono spesso ripetitivi. La ripetitività è proprio la ragione per cui ha un senso individuarne le cause, per cercare di rimuovere i problemi alla radice.

Un Sistema Intelligente, in generale, è un programma informatico che si comporta come un esperto in un dato campo: esso deve operare dando giustificazione delle sue decisioni e mostrando il ragionamento che sta alla base. Per costruire un sistema intelligente è necessario sviluppare le seguenti funzioni principali: una funzione di risoluzione di problemi, una funzione di interazione con l'utente ed una funzione per il trattamento dell'incertezza. La struttura tipica di un sistema intelligente contempla le seguenti componenti:

- **La base delle conoscenze**, che comprende le conoscenze specifiche al dominio di applicazione: semplici fatti riguardanti il dominio, regole che descrivono relazioni o fenomeni nel dominio e, eventualmente, anche metodi euristici ed idee per risolvere i problemi in tale dominio.
- **Il motore inferenziale**, capace di utilizzare le conoscenze che sono contenute nella base.
- **L'interfaccia utente**, che permette di gestire la comunicazione fra l'utente ed il sistema e fornisce all'utente un'idea del processo di risoluzione che viene eseguito dal motore inferenziale.

Il sistema intelligente è, comunque, solo uno degli elementi che possono essere necessari per dar luogo ad un sistema informativo di manutenzione: quest'ultimo dovrà essere integrato ossia in grado di comunicare sia con il mondo delle risorse produttive, sia con il mondo della progettazione. Ciò consente il miglioramento della diagnosi, attraverso la definizione e l'aggiornamento di modelli di comportamento di guasto del sistema, la taratura del modello consentita dall'analisi dei dati provenienti dal campo, la rielaborazione in tempo reale dei segnali deboli e di tutte le informazioni che riguardano il comportamento dei mezzi (Machine Learning).

L'omologazione dei criteri di raccolta ed elaborazione delle informazioni, inoltre, consentirebbe di confrontare le prestazioni di sistemi appartenenti al medesimo settore. Tale sistema informativo non può risiedere totalmente all'interno di una struttura centralizzata, poiché necessita di altri dispositivi, diversi dal calcolatore elettronico che sovrintende alla gestione, quali:

- **Sensori**: hanno il compito di rilevare i segnali elementari provenienti dai componenti e dalle funzioni del mezzo. Spesso si trovano già installati sulle macchine o vi è già una struttura pronta ad accoglierli.
- **Rete comunicazione**: le informazioni raccolte dai sensori debbono essere concentrate in nodi che, opportunamente collegati in rete fra loro e con un front end, consentono la trasmissione economica delle informazioni provenienti dai sensori. Spesso strutture siffatte sono già installate sui mezzi per trasmettere i dati relativi al processo.
- **Front end**: si tratta di un calcolatore che provvede al continuo monitoraggio dei dati provenienti dai sensori attraverso la rete di comunicazione e che ha il compito di filtrare le informazioni non banali, passandole successivamente al sistema intelligente cui è collegato. Preferibilmente questo dispositivo deve essere dedicato.

- **Sistema Intelligente:** una struttura hardware/software che consente l'analisi delle informazioni provenienti dal campo, attraverso il front end, confrontando la situazione anomala con la base di conoscenze alimentata ad esempio dalla FMECA e dalle informazioni ricavate operativamente: deve essere anch'esso un dispositivo dedicato.

In una fase successiva, il manutentore dovrà poter interagire con il sistema intelligente per capire se è necessario eseguire un intervento preventivo a seguito dei segnali rilevati, oppure per diagnosticare la causa del guasto. In ogni caso, dall'interazione con il sistema intelligente il manutentore ricaverà informazioni sufficienti per regolarsi sulle azioni da intraprendere. La retroazione del sistema viene garantita dallo stesso manutentore che, in seguito alla segnalazione avuta, registra nel sistema intelligente l'intervento effettuato, che può essere una semplice regolazione, la riparazione di un guasto, oppure un controllo. In quest'ultimo caso, egli segnalerà al sistema intelligente che quella particolare condizione non è da ritenersi critica. In questo modo si ottiene il continuo aggiornamento della base di conoscenze del sistema intelligente che, con questo processo, è in grado di apprendere dall'esperienza e di tararsi costantemente sui problemi che deve risolvere.

Un'ultima considerazione: è fortemente auspicabile la creazione e l'utilizzo di banche dati integrate e condivise (**Cloud**), nelle quali confluiscono informazioni relative ad un'intera tipologia di macchine/apparati/sistemi, in modo da mettere in comune le conoscenze acquisite sul campo, valorizzandole in un confronto continuo con altre realtà applicative. In campo aeronautico per esempio, un tale sistema consentirebbe di confrontare le prestazioni di equipaggiamenti comuni installati su tipologie di velivoli diversi, per identificare criticità simili o peculiari.

6.7 Tecniche innovative per la valutazione dell'affidabilità dei sistemi complessi

Negli ultimi anni si è assistito, prevalentemente in campo industriale, alla nascita di un vivo interesse nei confronti dei sistemi di processo automatico delle informazioni di tipo soft-computing. Con tale espressione vengono indicate tutte quelle metodologie di trattamento dei dati che si basano su algoritmi che non si limitano semplicemente ad elaborare le informazioni che ricevono, bensì creano altri algoritmi e procedure adatti a questo compito. In sostanza, si può parlare di meta-algoritmi in grado di generare gli algoritmi necessari al trattamento dei dati che ad essi vengono sottoposti.

Il soft-computing tra l'altro è una branca del campo di ricerca che si occupa della cosiddetta **Intelligenza Artificiale**.

Tra le strade principali che afferiscono al soft-computing è necessario annoverare:

- **Gli Algoritmi Genetici:** si utilizzano per l'ottimizzazione. Si sviluppa un algoritmo parametrizzato per trovare l'ottimo di una funzione, insieme a svariate stringhe di parametri casuali. Si esegue l'algoritmo con i parametri di ognuna delle stringhe e si selezionano le stringhe che hanno portato ai migliori risultati della funzione obiettivo, eliminando le altre. A questo punto vengono fatte "riprodurre" le stringhe vincenti con un cross-over genetico (da cui il nome). Ossia si crea un nuovo insieme di stringhe generato dal mescolamento degli elementi delle stringhe vincenti, insieme ad una modesta quantità di stringhe casuali. A questo punto si selezionano nuovamente le stringhe che raggiungono il miglior risultato e se ne ottengono di nuove dal loro accoppiamento. Il processo si itera sino a trovare la stringa che porta all'ottimo della funzione. L'importante, nell'utilizzare tali algoritmi, è prestare attenzione a non incappare in ottimi locali invece che globali: pertanto, solitamente, più algoritmi evolutivisti sono combinati tra loro per risolvere problemi di ottimizzazione.

- **Le Reti Neurali** sono dei sistemi adattivi che imparano a risolvere il problema che viene loro posto dopo un adeguato periodo di addestramento. Si sono sviluppate di pari passo con le ricerche in campo fisiologico del cervello umano. Le prime reti neurali altro non erano che modelli matematici del comportamento, a livello di attività sinaptica e quindi trasmissione di informazioni, dei neuroni biologici. La ricerca sulle reti neurali si è poi svincolata dalla sua indagine in campo fisiologico (che comunque prosegue) ed ha cominciato ad abbracciare un vasto campo di applicazioni industriali che ha portato a risultati incoraggianti, tanto da essere ormai considerato uno strumento di lavoro al pari dei tradizionali sistemi di processo delle informazioni.

Interessante potrebbe essere anche il ricorso a sistemi manutentivi soft-computing ibridi, ovvero basati sull'impiego contemporaneo di diverse tecnologie del tipo di quelle a cui si è fatto cenno. Fra le tecniche innovative, infine, vale senz'altro la pena di citare anche il ricorso alla modellizzazione e alla simulazione di sistemi e fenomeni (esempio simulazione di Montecarlo basata sulla generazione di numeri casuali o pseudo casuali rappresentativi di situazioni reali), che può essere di grande beneficio quando si accetta di monitorare lo stato di un apparato attraverso un suo modello funzionale, implementato generalmente al computer. In tal modo, tra l'altro, si apre anche la possibilità alla realizzazione di dispositivi utili alla gestione stessa dei sistemi, quando si immagina che il modello venga fatto funzionare in parallelo al sistema reale e fornisca informazioni utilizzate per impostare i comandi di controllo del sistema stesso.

6.7.1 Tele manutenzione

Per Tele manutenzione si intende la gestione a distanza di un sistema. Tale possibilità, resa possibile anche in questo caso dagli sviluppi tecnologici degli ultimi anni, in particolare in campo sensoristico e tele-comunicativo, rappresenta un traguardo estremamente interessante non solo in campo prettamente industriale, ove le applicazioni sono già numerose, ma anche in campo civile, immobiliare, impiantistico tecnologico e infrastrutturale. La possibilità di verificare il funzionamento di un macchinario o di tenere sotto controllo l'esercizio di un impianto, anche a distanza, rappresenta una esigenza oggi particolarmente sentita e sempre più pressante. La tele manutenzione, unita a un opportuno sistema informatico, può far dialogare la persona che conosce perfettamente il sistema con la persona che è sul posto ma che non conosce tutti i dettagli di funzionamento della macchina: **si può così permettere al costruttore di aiutare a distanza il manutentore o intervenire anche su macchine complesse riducendo le spese.**

6.8 Benefici della prognostica sul supporto logistico

Una adeguata strategia di manutenzione basata sulla prognostica, che avvalendosi di tecniche di monitoraggio avanzate acquisisce tutte le informazioni possibili sullo stato di salute delle macchine e dei processi, al fine di individuare sul nascere i difetti, seguirne la loro evoluzione nel tempo e programmare con congruo anticipo e flessibilità le necessarie azioni correttive da effettuarsi solo quando strettamente necessarie (in base alla valutazione di vita residua dei componenti del sistema), porterebbe le aziende a razionalizzare la gestione delle risorse interne al fine di perseguire principalmente due obiettivi:

1. Una crescita della redditività dei Prodotti
2. Una riduzione dei costi di produzione e di manutenzione salvaguardando gli standard di sicurezza, di affidabilità e di efficienza dei processi produttivi

Si verificherebbe inoltre:

- Un'intensificazione dei controlli periodici delle grandezze sensibili ai meccanismi di usura e degrado delle macchine con l'implementazione di tecniche diagnostiche
- Un controllo della evoluzione dei difetti nel tempo
- Una semplificazione/essenzialità delle azioni correttive
- Un allungamento delle cadenze degli interventi manutentivi (ricondizionamento e/o sostituzione dei componenti del sistema)

L'applicazione di tale tecnica influenzerebbe e porterebbe certamente grossi benefici a tutto l'ambito logistico con ripercussioni non trascurabili su tutta la catena di supporto.

I vantaggi ottenibili potrebbero essere i seguenti:

- ✓ Miglioramento di qualità e sicurezza
- ✓ Riduzione dei costi di manutenzione rispetto al metodo della manutenzione periodica o a tempo definito
- ✓ Riduzione dei tempi di Fault Diagnosis
- ✓ Allarmi automatici in caso di condizione di errore o in caso vengano riconosciute avvisaglie di failures
- ✓ Possibilità di poter richiamare in real-time la manualistica legata a ciascun item di sistema in modo coerente ed on-line
- ✓ Accesso da parte dei manutentori a documentazione e procedure relative alle parti tramite dispositivi ad hoc
- ✓ Continuità di funzionamento dei processi produttivi non gravati da eccessive e costose riserve/scorte
- ✓ La ricezione dell'ordine per la parte guasta e la relativa uscita del particolare dal magazzino, emette in automatico l'ordine di reintegro presso il magazzino e/o fornitore (con il vantaggio che la prognostica porterebbe ad avere un unico magazzino centrale che rifornisca più basi, al patto che la tempistica per far pervenire il pezzo di ricambio sia paragonabile all'anticipo di segnalazione della failure)
- ✓ Tracking delle effettive ore di utilizzo e condizioni operative ambientali tramite applicazione di smart sensor o ad esempio Tag RFID (Radio Frequency Identification), passivi e/o attivi
- ✓ Rilevazione parametri di funzionamento come ad esempio vibrazioni, forze applicate ai vari componenti, tasso di stress del componente, etc.
- ✓ Registrazione diretta della storia degli interventi effettuati e delle relative certificazioni
- ✓ Tracciamento del prodotto e delle sue parti nei singoli step dalla fabbricazione all'installazione
- ✓ Disponibilità di tutte le informazioni configurative d'esercizio sito per sito, in real-time e da qualsiasi posizione del globo
- ✓ Riduzione dei sopralluoghi e delle ispezioni sul campo per inventariare l'installato
- ✓ Rapida identificazione e localizzazione delle corrette parti di ricambio
- ✓ Gestione dettagli di configurazione senza necessità di smontaggio parti
- ✓ Miglioramento nell'efficienza della gestione e nella riduzione tempi di risposta alle attese del Cliente
- ✓ Riduzione dei tempi di fermo macchina per diagnosi o mancanza ricambi
- ✓ Aumento della vita residua dei componenti del velivolo

- ✓ Riduzione degli interventi non ancora necessari
- ✓ Prevenzione di guasti e riduzione della manutenzione non pianificata (con conseguenti vantaggi dal punto di vista economico)
- ✓ Trasmissione sistematica e tempestiva dei dati di funzionamento e affidabilità dei componenti ai fornitori per miglioramento qualità e riduzione costi
- ✓ Drastica riduzione dei tempi di intervento manutentivo da parte del personale tecnico che potrà acquisire tutte informazioni relative alla storia manutentiva del sistema e delle sue parti, verificando inoltre l'eventuale accadimento di guasti simili sul sistema informativo aziendale e le relative modalità riparazione (trouble-shooting elettronico)
- ✓ Fill-in automatico dei task di manutenzione con acquisizione diretta dei dati di intervento e parti utilizzate
- ✓ Riduzione e miglior organizzazione del personale addetto alle manutenzioni o ad altre competenze
- ✓ Dialogo diretto tra utilizzatore e specialista/progettista tramite telemanutenzione

Un tale sistema informatico innovativo deve inoltre prevedere delle capacità di cybersicurezza sia da minacce esterne sia nel consentire l'utilizzo dello stesso solo a personale autorizzato.

Ipotizzando quindi di avere a disposizione un moderno sistema di Health Management System, in cui si integrano le funzioni di Manutenzione Predittiva, è possibile sintetizzare alcune ricadute sulle aree del Supporto Logistico Integrato:

1. PUBBLICAZIONI TECNICHE

- La prognostica integrata in un Health Management System del velivolo potrebbe beneficiare nella raccolta di informazioni inerenti il successo di un'azione manutentiva del personale a seguito dell'applicazione degli interventi consigliati, in particolare in caso di manutenzioni correttive. L'abbinamento delle informazioni sulla possibile failure con la tipologia di azione manutentiva più appropriata, nonché statisticamente di maggior efficienza, potrebbe portare ad una riduzione dei tempi di manutenzione e quindi ad una maggiore disponibilità del velivolo. Inoltre predisponendo per ogni equipaggiamento un chip con all'interno i manuali tecnici di riferimento si permetterebbe agli operatori addetti alla manutenzione di accedere direttamente alle necessarie istruzioni di manutenzione, velocizzando così l'intervento stesso.

2. MATERIAL SUPPORT

- Poiché l'MTBF/MTBUR viene utilizzato per il dimensionamento iniziale delle scorte necessarie a supportare una flotta di velivoli per un determinato periodo di servizio (anche se poi tutto varia in funzione dell'andamento dei prodotti in servizio), la prognostica (che consentirebbe il calcolo della "vita residua" di un componente), porterebbe a ottimizzare le scorte di magazzino in funzione della vita operativa del componente (riducendo la scorta di magazzino richiesta e conseguentemente i costi).
- Un altro beneficio potrebbe essere la riduzione o l'azzeramento del Waiting Time nel caso di magazzini centralizzati (quindi non presenti in tutte le basi) in quanto non si verificherebbe la necessità di far star fermo il velivolo in attesa del ricambio in arrivo. Questo aumenterebbe l'Availability dei sistemi coinvolti. Considerando che la prognostica verrebbe applicata ad equipaggiamenti complessi e costosi si otterrebbero notevoli vantaggi sia in termini di costi d'acquisto che di gestione. Infine, si potrebbero dimensionare i ricambi evitando

rischi di low-stock e over-stock (riducendo i margini di sicurezza nel calcolo di ricambi di magazzino).

3. CONTROLLO CONFIGURAZIONE

- Avere chip interconnessi tra loro, a formare una rete di sensori, in grado di ricevere, trasmettere e salvare informazioni, consentirebbe di immagazzinare una serie di dati quali ad esempio caratteristiche fisiche del componente, stato configurativo, Part Number, Serial Number, ore di volo, stato di usura o stress, temperature di esercizio, registrare quante volte per quanto tempo e in che condizioni il componente ha lavorato fuori range ottimale (determinante per capire come si è velocizzato il processo di vita del componente stesso), etc.
- Si potrebbero inoltre registrare le manutenzioni effettuate, le modifiche apportate (MOD), raccogliere dati (ambientali e operativi) ed elaborarli, accedere direttamente ai manuali, etc.

4. SUPPORTO TECNICO

- L'attività di manutenzione non programmata rappresenta tra le tipologie manutentive quella a maggior impatto: anticipare una possibile failure consentirebbe di ottimizzare i tempi di gestione e quindi la manutenzione stessa.
- Si potrebbe usufruire di sistemi informatici moderni con capacità di Big Data e Analytics, in modo da mantenere sempre sotto controllo, complessivamente, la situazione di esercizio, così da essere più tempestivi e di maggior aiuto alle richieste del Cliente.
- Si potrebbe simulare via software la manutenzione in linea per ottimizzare i tempi di intervento.

5. GESTIONE MAGAZZINI

- Oltre al già citato supporto all'approvvigionamento di parti, che consentirebbe di evitare casi di low/over-stock, e quindi di avere magazzini con parti inutilizzate o non sufficienti, un sistema di Health Management System, coadiuvato dal tracciamento con chip dei ricambi, permetterebbe di ottimizzare la catena logistica, agendo con azioni mirate sulle parti in consegna, da acquistare o da riparare, in funzione dell'effettiva domanda di ricambi del Cliente. Ciò permetterebbe, in ultimo, di evitare quanto più possibile, casi di indisponibilità del velivolo per mancanza parti.

7 CASO DI STUDIO

7.1 Generalità

In questa sezione, dopo una generale panoramica sulle batterie utilizzate negli attuali velivoli, verrà presentato il modello semplificato di una batteria al Ni-Cd, che stima la perdita di capacità ad ogni ciclo di carica e scarica, tramite l'utilizzo del Kalman Filter. Seguirà dunque una LCCA limitata alla fase di servizio dei velivoli prendendo come riferimento i dati ottenuti tramite tale modello, e si confronterà con un esercizio di Life Cycle Cost Analysis di un caso reale. Tale procedura servirà a illustrare i possibili vantaggi e le sfide da affrontare derivanti dall'applicazione della manutenzione predittiva.

7.2 Nickel Cadmium Batterie

Le batterie Ni/Cd appartengono a un gruppo di cinque batterie ricaricabili (Ni-Cd, Ni-MH, Ni-H₂, Ni-Zn, Ni-Fe) che hanno in comune un elettrodo positivo a base di Ni e una soluzione alcalina. Anche se alcuni inconvenienti noti possono essere associati alla batteria Ni / Cd, tra cui la bassa densità di energia e l'impatto ambientale, esse possono essere vantaggiosamente utilizzate in numerose applicazioni industriali.

7.2.1 Tipi di Batterie Ni/Cd

Le batterie Ni / Cd possono essere catalogate in due grandi categorie: ventilate e sigillate. Inoltre le batterie ventilate possono essere a loro volta suddivise in base alle differenti configurazioni degli elettrodi:

- **Pocket plate:** È la più vecchia configurazione. Entrambi gli elettrodi hanno tasche piatte di nastri perforati di acciaio nichelato che tengono in posizione i materiali attivi. L'elettrodo positivo è formato da una miscela contenente Ni(OH)₂(80%), Co(OH)₂ (2%) e grafite (18%), mentre la miscela per il negativo contiene Cd(OH)₂ (78%), Fe (18%) e piccole quantità di Ni e grafite.



Figura 16 Pocket Plate Ni-Cd

- **Piastra sinterizzata:** L'elettrodo sinterizzato è stato pensato per aumentare la produzione di energia della batteria Ni/Cd. Grazie alla particolare configurazione dell'elettrodo, la densità di energia è superiore del 50% rispetto a quella della Pocket plate. Inoltre, l'elettrodo sinterizzato può essere molto più sottile, che comporta una capacità più elevata. Altre caratteristiche favorevoli inclu-

dono profilo di scarico piatto, buona conservazione della capacità e buone prestazioni a basse temperature. Lo svantaggio di tale configurazione è l'elevato costo dell'elettrodo sinterizzato e la necessità di un attento controllo della temperatura durante la carica, dove si manifesta l'effetto memoria. Tale tipologia di batteria è utilizzata soprattutto quando è richiesta una potenza elevata, ad es. avviamento del motore a turbina dell'aeromobili. In molte applicazioni, queste batterie consentono una riduzione di dimensioni e peso.

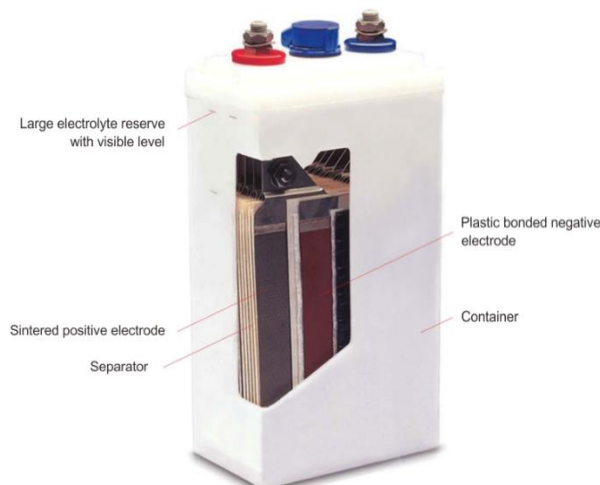


Figura 17 Sintered plate Ni-Cd

- **FNC (fibra di nichel cadmio).** Queste batterie utilizzano elettrodi strutturati in fibra: una matrice di fibre sintetiche viene nichelata e successivamente sinterizzata con H_2 a $800^\circ C$. Il passaggio finale è l'impregnazione con la massa attiva. Questo metodo consente la produzione di elettrodi con uno spessore compreso tra 0,6 e 10 mm senza modificare il rapporto tra i substrati conduttori correnti e la massa attiva. Il substrato è molto poroso (90%) e consente un eccellente utilizzo del materiale attivo. Non è necessario alcun additivo conduttivo.

A seconda dello spessore dell'elettrodo, è possibile costruire batterie con una potenza variabile da bassa a molto elevata. La maggiore efficienza di carica di queste batterie comporta una minore quantità di gas e, pertanto, l'irrigazione delle celle ventilate è meno frequente.



Figura 18 FNC Ni-Cd

- **Sealed Sintered plate:** L'elettrodo Cd ha una capacità maggiore rispetto al positivo (rapporto: 2 a 1) in modo che, in carica, quest'ultimo raggiunga lo stato completamente carico prima e inizi a evolversi O_2 . L'ossigeno migra verso il negativo attraverso un separatore permeabile, e subisce una reazione di riduzione portando a $Cd(OH)_2$. Vengono utilizzate non solo in dispositivi portatili ma anche in numerose applicazioni fisse (illuminazione di emergenza, apparecchiature di comunicazione, ecc.) con capacità fino a 25 Ah.

7.2.2 Reazioni carica/scarica

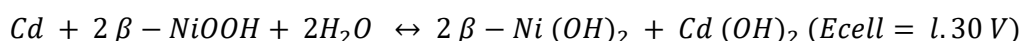
Le reazioni che determinano la capacità della batteria sono:

- Elettrodo negativo: $Cd + 2OH \leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2e$
- Elettrodo positivo: $\beta - NiOOH + H_2O + e \leftrightarrow \beta - Ni(OH)_2 + OH$

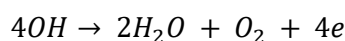
All'elettrodo negativo, è in funzione un meccanismo di dissoluzione-precipitazione, con formazione di intermedi solubili come $Cd(OH)_3^-$ o $Cd(OH)_4^{2-}$.

La riduzione reversibile di $NiOOH$ a $Ni(OH)_2$ comporta l'intercalazione di uno ione idrogeno nella struttura a strati del primo.

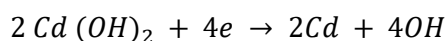
La reazione generale è:



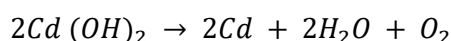
Durante la carica, l'elettrolisi H_2O è in competizione con le reazioni primarie. Per le celle ventilate il rilascio di H_2 e O_2 avviene tramite il processo di ventilazione; nelle celle sigillate, O_2 si evolve mentre l'elettrodo positivo che limita la capacità entra in sovraccarico, secondo alla reazione:



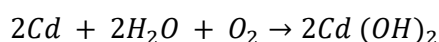
All'elettrodo negativo si verifica la formazione di Cd:



La reazione elettrochimica complessiva in queste condizioni è:



O_2 si sono evoluti ai viaggi positivi attraverso il separatore permeabile e reagiscono chimicamente con Cd:



La somma netta delle reazioni elettrochimiche e chimiche complessive in caso di sovraccarico è zero, ovvero non si verificano cambiamenti chimici. Ciò significa che l'elettricità viene appena convertita in calore: in effetti, la reazione di sovraccarico è esotermica.

Il meccanismo di ricombinazione O_2 è mostrato visivamente nella Figura 18. La ricombinazione O_2 in celle sigillate rende le fasi finali del processo di carica abbastanza diverse rispetto a quelle delle celle ventilate. Nelle celle ventilate, all'avvicinarsi della ricarica completa, l'elettrolisi H_2O provoca un forte aumento della tensione. Al contrario, il meccanismo di ricombinazione del gas limita l'aumento di tensione nelle celle sigillate ed è consentito un certo grado di sovraccarico.

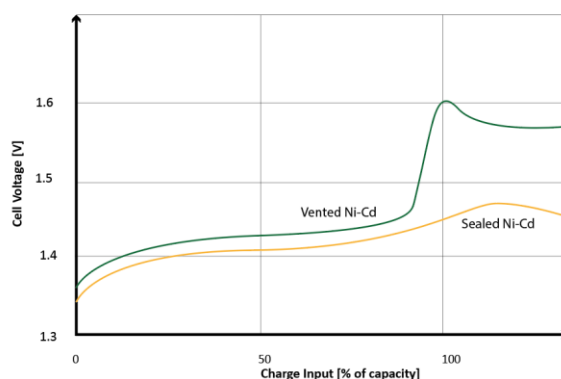
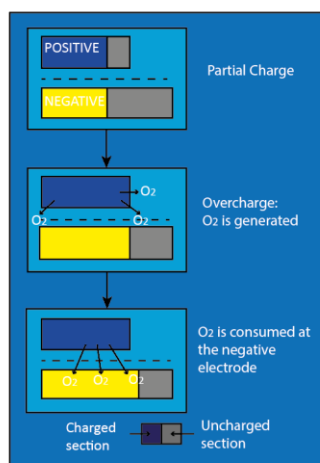


Figura 19 Reazione carica/scarica

7.3 Caratteristiche di scarica, Effetto memoria and Self-Discharge

Nelle batterie Ni-Cd la capacità di sostenere alti tassi di scarica è buona, ma dipende dalla configurazione delle celle. Ciò è sottolineato nella tabella seguente, in cui viene effettuato un confronto tra i diversi tipi presentati:

RATE (C)	CAPACITY (%)			
	Vented Pocket Plate	Vented Sintered Plate	FNC	Sealed Sintered Plate
0,1	102			
0,2	100		106	113
0,5	92		102	
1	82	100	99	103
2	76			
3	67	8		
4				92
5	58	77	98	
8				83
10		63	88	

Tabella 1 Capacità di diverse batterie Ni-Cd a diversi tassi di scarica

La Pocket place ha il tasso di capacità più basso. È interessante notare che, da questo punto di vista, l'elettrodo sinterizzato funziona meglio nelle celle sigillate rispetto alle celle ventilate. Ciò deriva dal fatto che grazie al design cilindrico per le prime, possono essere utilizzati elettrodi laminati sottili, mentre nelle celle ventilate (prismatiche) sono utilizzate piastre piatte. Infine, si nota come gli elettrodi in fibra manifestano un eccezionale tasso di capacità e possono essere costruite celle con velocità ultra elevate di scarica. Ad esempio, una cella ad alta velocità da 47 Ah può essere scaricata per 60 secondi con correnti nell'intervallo $1 \div 2,5 \text{ kA}$.

In figura sono riportate le curve che mostrano la variazione di tensione a diversi tassi di scarica per una Sealed cell:

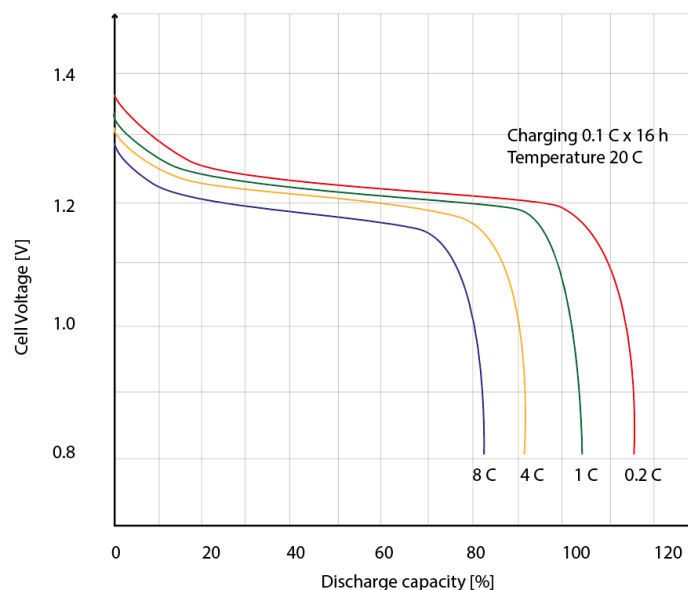


Figura 20 Variazione tensione a diversi ratei di scarica

Si osserva come la regolazione della tensione è buona anche a velocità elevate, con uno pseudoplateau a circa 1,2 V. Tuttavia, il profilo della curva può essere sensibilmente modificato in presenza del cosiddetto “**Effetto memoria**” (depressione della tensione), particolarmente ricorrente nelle celle sigillate. Ciò si verifica in caso di scariche superficiali ripetitive. Dopo la ricarica, la cella potrebbe non essere in grado di fornire la sua piena capacità a una determinata tensione di interruzione, come se si ricordasse le scariche superficiali precedenti. Ciò è dovuto alla diminuzione della tensione (circa 100 mV) che accompagna l'effetto. La piena capacità può essere recuperata con alcune scariche profonde seguite da cariche complete. Tuttavia, come mostrato nella figura, ciò potrebbe non essere possibile dopo un numero elevato di scariche superficiali.

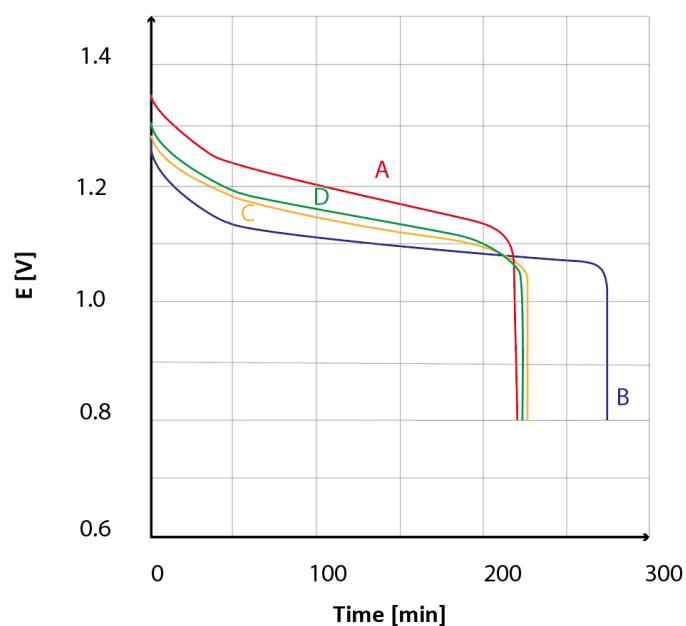


Figura 21 Effetto memoria

La figura mostra il verificarsi dell'effetto memoria in un esperimento condotto su una cella Ni-Cd sottoposta a 100 cicli di scarica superficiale:

- A: Curva di scarica, stato efficiente
- B: Prima scarica superficiale dopo 100 cicli
- C: Seconda scarica superficiale
- D: Terza scarica superficiale

Un effetto simile può essere osservato con un sovraccarico a lungo termine, specialmente alle alte temperature.

La maggior parte delle batterie Ni-Cd può essere conservata nell'intervallo di temperatura $-30^{\circ} \div 60^{\circ} C$ senza un significativo deterioramento delle prestazioni. Alcune batterie sono state conservate per un massimo di 10 anni e potrebbero ancora fornire, dopo la ricarica, quasi il 100% della loro capacità originale. Il tasso di perdita di capacità è correlato, a una data temperatura, alla struttura dell'elettrodo.

7.3.1 Tecniche di ricarica

Le batterie Ni-Cd possono essere caricate con metodi CC o CV o loro modifiche. Tuttavia, la ricarica CC è normalmente preferita per tutti i tipi. In tutti i casi, una fase finale consistente in una carica di mantenimento può essere applicata a:

- controbilanciare l'autoscarica delle batterie di riserva che devono mantenere il loro pieno stato di carica;
- completare una carica (relativamente) veloce.

Nelle batterie ventilate, il sovraccarico deve essere limitato al 101-105% per evitare un'eccessiva generazione di gas e frequenti rifornimenti di acqua. Al contrario, le batterie sigillate possono offrire un livello superiore di sovraccarico grazie al meccanismo di ricombinazione del gas. Queste batterie utilizzano tecniche di rilevamento del punto finale, che possono essere basate sull'aumento della temperatura quando si avvicina la carica completa o sul picco di tensione tipico che appare in sovraccarico. Questi metodi sono illustrati in figura:

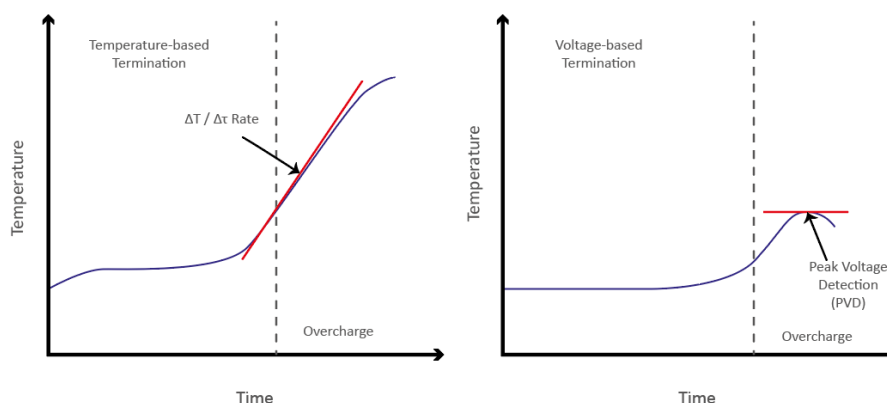


Figura 22 Metodi di Carica

Il massimo della tensione segnala la fine dell'ossidazione sull'elettrodo positivo. Il rilevamento del picco diventa meno definito quando la velocità di carica diminuisce e se la temperatura si avvicina o supera i $40^{\circ} C$. In questi casi, il tasso di aumento della temperatura ($\Delta T / \Delta \tau$) fornisce risultati più affidabili; tuttavia, con quest'ultimo metodo, la batteria potrebbe essere soggetta a un

sovraccarico maggiore, riducendo così la sua durata. La carica rapida è possibile se la velocità non è superiore a quella della ricombinazione O_2 o della dissipazione del calore: in questo caso, la pressione interna e la temperatura rimangono basse durante il processo di carica. Ciò è reso possibile da strutture di elettrodi progettate correttamente e dalla distribuzione degli elettroliti.

7.3.2 Cycle Life

Le batterie Ni / Cd sono in grado di funzionare a lungo anche con **Discharge Of Depth** (DOD) elevati. Sono possibili numeri di ciclo nell'intervallo 500-5000.

La batteria Ni / Cd ha un andamento lineare rispetto a DOD e può ancora erogare circa 1400 cicli all'80% di DOD. L'attitudine di mantenere una capacità quasi stabile su cicli estesi è mostrata nella Figura sottostante e può essere riferita alla variazione molto limitata della resistenza interna. Questa è normalmente bassa (alcuni millihoms attraverso un elettrodo a piastra sinterizzata) ed è stato dimostrato che rimane praticamente costante in funzione dello **State of Charge** (SOC) e dopo un lungo ciclo.

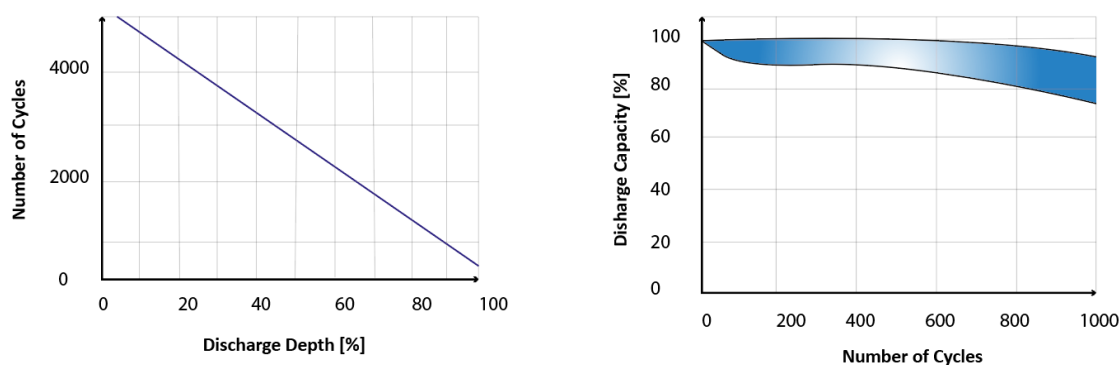


Figura 23 Cycle Life

7.4 Batterie sul velivolo

Il numero di equipaggiamenti per aeromobili che richiedono una alimentazione a batterie sono numerosi: unità di illuminazione di emergenza, le apparecchiature avioniche, la distribuzione delle uscite di emergenza e le apparecchiature mediche di emergenza. Per tale ragione in un velivolo vi è la presenza di più batterie: la più importante è la batteria "principale" o "di emergenza", che è l'oggetto di questa sezione.

7.4.1 Batteria Principale

La batteria principale dei velivoli di oggi ha diversi ruoli:

- Fornire energia elettrica necessaria in casi di emergenza come ad esempio nel caso di guasto della fonte di generazione elettrica principale, per assicurare il ritorno a terra dell'aeromobile per un periodo di 30 o 60 minuti.
- Avvio del motore o dell'unità di potenza ausiliaria (APU), che richiede alti picchi di potenza per una breve durata, in genere dai 15 ai 30 secondi. L'alta potenza è anche una caratteristica richiesta per la commutazione e il trasferimento quando la batteria può alimentare interruttori o contattori e supporta carichi essenziali durante il processo.

- In un arco di tempo più breve, la batteria può fungere da filtro capacitivo che aiuta a regolare la rete DC dell'aeromobile, riducendo l'effetto di transitori e picchi e CA sovrapposti che possono derivare dalla fonte di generazione.
- L'energia della batteria principale viene utilizzata anche a terra durante il rifornimento e i controlli.

7.5 Definizione Ambiente Aircraft

7.5.1 Generalità

Gli equipaggiamenti e i sistemi degli aeromobili sono soggetti ai requisiti delle autorità di regolamentazione, come la FAA negli Stati Uniti o l'EASA in Europa. Si preoccupano principalmente di assicurare che le batterie non presentino rischi per la sicurezza degli aeromobili. Naturalmente, la scelta della batteria deve basarsi su un'analisi effettuata dal progettista del sistema aeronautico in conformità con le normative FAA / EASA, tenendo conto dei fattori di declassamento (prestazioni a fine vita, temperatura, stato di carica, ecc.) che possono influire sulle prestazioni della batteria.

Al fine di garantire l'aeronavigabilità, devono essere stabilite procedure per la loro dimostrazione nella fase di test di qualificazione e per tutta la vita.

Esistono diversi standard specifici per le batterie degli aeromobili, principalmente volti a definire metodi comuni di prova delle prestazioni e della sicurezza basati sull'ambiente dell'aeromobile.

L'ambiente può essere generalmente caratterizzato in base al tipo di aeromobile, tipo di motore, vicinanza a fonti di vibrazione. Ogni fattore influenzerà la temperatura, l'altitudine, l'accelerazione, gli urti e le vibrazioni a cui sarà esposta la batteria. Inoltre, possono essere applicati altri requisiti di esposizione come umidità, nebbia salina e resistenza ai contaminanti come detergenti, carburante e lubrificanti. Il cuore elettrochimico delle principali batterie degli aeromobili non è una fonte di interferenza elettromagnetica al sistema elettrico dell'aeromobile. Allo stesso modo, è considerato immune agli effetti di disturbi elettromagnetici esterni che possono essere indotti da un fulmine sull'aeromobile.

Temperature

I requisiti di temperatura sono in genere:

- sopravvivenza al suolo (durata limitata)
- variazione di temperatura: da -55°C a $+85^{\circ}\text{C}$ (transizione di shock termico $<5\text{ min}$)
- funzionamento: da -40°C a $+70^{\circ}\text{C}$.

Tuttavia, riconoscendo i limiti delle sostanze chimiche disponibili, i limiti devono essere accettati agli estremi della temperatura. Ad esempio, -20°C è normalmente il limite pratico per l'avvio del servizio su aeromobili commerciali.

Altitudine

Le apparecchiature in zone non pressurizzate devono resistere ad altitudini comprese tra 1.300 piedi e 60.000 piedi. L'altitudine equivalente nelle zone sotto pressione è in genere di 8.000 piedi, ma in tal caso devono essere tenuti in considerazione anche gli effetti della rapida decompressione.

Meccanico

I requisiti di shock e accelerazione sono imposti a due livelli: un livello operativo "normale" e un livello di "crash" più elevato. Nel primo caso, la batteria deve funzionare normalmente mentre nel secondo caso deve rimanere intatta. I livelli operativi dipendono dal tipo di aeromobile e riguardano

effetti come il buffeting aerodinamico, ma sono inevitabilmente più elevati per gli aeromobili militari sottoposti a manovre acrobatiche.

7.6 Tecnologie attuali

Le principali batterie per aerei da 24 V sono disponibili con capacità comprese tra 15 e 60 Ah. Le prestazioni effettive dipendono dal compromesso tra energia e potenza.

Il numero di batterie installate nell'aeromobile dipende dall'architettura del sistema. Quando è necessaria più di una batteria, viene spesso specificato per motivi logistici (numero ridotto di parti, intercambiabilità, ecc.) che devono essere dello stesso tipo. In aeromobili più piccoli, ci sono comunemente due batterie. Uno viene utilizzato per l'avvio e, al fine di massimizzare la disponibilità di energia, la sua tensione può scendere a 12-14 V. Durante l'avvio, la seconda batteria supporta carichi imposti da apparecchiature essenziali che verrebbero interrotti se la tensione di alimentazione scendesse al di sotto 18 - 20 V.

In condizioni di emergenza, le batterie sono collegate in parallelo per fornire l'energia necessaria.

La differenza nelle dimensioni della batteria deriva dai diversi requisiti di avvio e di emergenza e dai diversi sistemi di ricarica.

7.6.1 Carica On board

Molte batterie vengono caricate tramite la connessione diretta alla rete DC, che è a sua volta alimentata da un generatore DC o da un alternatore e trasformatore. Poiché la tensione di carica non può essere facilmente modificata, se non del tutto, vi è poco spazio per ottimizzare la carica della batteria con tali sistemi.

Alcuni sistemi di aeromobili utilizzano caricabatterie dedicati che possono anche svolgere un ruolo nella regolazione della rete DC. Tali caricabatterie generalmente modificano la corrente e la tensione di carica in funzione della temperatura della batteria e del tempo di carica al fine di massimizzare il SOC nel più breve tempo possibile, riducendo al minimo il sovraccarico che contribuisce all'invecchiamento.

Il fenomeno della fuga termica è stato a lungo fonte di preoccupazione per le autorità di regolamentazione. Quando la velocità di generazione del calore in una batteria supera la velocità di dissipazione del calore, la temperatura della batteria aumenta. Il calore generato durante lo scarico o il sovraccarico viene dissipato principalmente per convezione naturale sebbene alcuni design specifici della batteria consentano una convezione forzata. Durante una carica a voltaggio costante, la generazione di calore è bilanciata dalla dissipazione del calore, in modo da stabilire una condizione stabile. Tuttavia, in alcune circostanze, può verificarsi instabilità termica.

A una determinata tensione di carica, la corrente di sovraccarico dipende dalla temperatura della batteria. In questo caso, se la temperatura aumenta, la corrente di sovraccarico aumenta, determinando così una maggiore generazione di calore e un ulteriore aumento della temperatura, e così via. In questo modo, si può stabilire un circolo vizioso che porta ad un rapido aumento della temperatura. Le cause di instabilità comprendono:

- tensione di carica troppo elevata rispetto alla temperatura ambiente elevata;
- sequenze operative specifiche, ad es. avviamenti frequenti a temperature elevate che portano all'accumulo di calore accumulato;

- manutenzione errata che non rileva i segni del tempo.

7.6.2 Duty cycle

Il Duty cycle di una batteria dell'aeromobile dipende dal suo ruolo all'interno dell'architettura del sistema a cui è collegata e dal profilo operativo dell'aeromobile. È quindi difficile definire la durata di ciclo di lavoro completo relativo a scarica profonda e carica. Quest'ultima dipende in gran parte dalla durata del volo e delle operazioni a terra.

Inoltre il rapporto tra le ore di funzionamento e le ore di volo può variare tra 1,3 e 2,5 a seconda che l'aeromobile sia utilizzato per le operazioni pendolari o a lungo raggio.

A volte può essere necessario più di un tentativo di avvio, sebbene di solito sia limitato a tre per evitare danni al motore o all'APU. Tuttavia, la batteria di avviamento dedicata può essere utilizzata prima di ogni decollo o solo quando non è disponibile l'alimentazione di terra. Può anche essere utilizzata per l'alimentazione dell'APU, quando necessario, durante la fase di atterraggio. Invece la batteria di emergenza potrebbe non scaricarsi mai in modo significativo.

Ambedue le batterie possono essere scaricate a terra quando l'alimentazione di terra è scollegata e non è disponibile alcuna generazione a bordo, a causa di carichi applicati ad esempio durante l'avvio e lo spegnimento del sistema, la preparazione del volo e il rifornimento di carburante.

7.6.3 Vita della batteria

La durata della batteria dipende da vari fattori come il numero di ore di funzionamento, la temperatura ambiente, la frequenza di avvio e la carica a bordo. È quindi difficile determinare in anticipo quanto tempo sarà la vita prevista di una cella nella situazione reale. In genere, la durata delle batterie Ni-Cd ventilate sui aerei di trasporto a lungo raggio va dai 6 ai 9 anni, mentre negli aerei pendolari dai 5 ai 7 anni. D'altra parte, negli addestratori militari e nei combattenti sono in genere dai 4 ai 6 anni.

Esistono tre principali meccanismi di guasto, tutti progressivi, che si verificano in una batteria Ni-Cd ventilata:

1. guasto della barriera dell'ossigeno (causa dissipazione termica);
2. guasto del separatore (cortocircuito all'interno di una o più celle);
3. perdita irreversibile della capacità dovuta al degrado dei materiali attivi.

Il guasto su circuito aperto è quasi sconosciuto. Le procedure di manutenzione preventiva rilevano guasti imminenti, prima che possano verificarsi a bordo dell'aeromobile, con un elevato grado di affidabilità. Mentre la perdita di capacità è progressiva, l'isolamento attivo del materiale può essere rapidamente provocato da scariche profonde come può verificarsi durante il funzionamento a terra. Più problematico per le applicazioni aeronautiche, dove è normalmente richiesta la disponibilità permanente anche in condizioni di funzionamento degradato, è la corrosione che può portare a guasti della batteria a circuito aperto senza preavviso.

7.7 Future Trends

Poiché la riduzione del peso comporta una riduzione del consumo di carburante e/o un aumento del carico utile, il produttore dell'aeromobile continuerà a cercare di ridurre al minimo il peso e questo vale anche per le apparecchiature, come le batterie e le loro strutture di supporto. È improbabile che una riduzione significativa del peso sia disponibile con le tecnologie tradizionali

della batteria, quindi la soluzione dovrebbe provenire dalla tecnologia Li-Ion. Ancora più importante, un numero crescente di apparecchiature sta portando a una crescita dei requisiti di generazione di energia. Gli aerei di oggi hanno quattro fonti di generazione di energia: meccanica, idraulica, pneumatica ed elettrica. Per motivi di risparmio di peso, manutenibilità, affidabilità ed efficienza, i produttori di aeromobili stanno cercando di concentrare sempre più parte di questa generazione verso l'elettrico, ad esempio sostituendo i circuiti idraulici e gli attuatori con quelli elettrici. Andando oltre nel futuro, le celle a combustibile offrono la possibilità di sostituire le attuali macchine di propulsione ausiliarie a combustione interna. Tuttavia, è probabile che richiedano il supporto della batteria per determinate fasi del loro funzionamento. Questi sviluppi stanno portando a un riesame dei sistemi elettrici dell'aeromobile, ad esempio il raddoppio della tensione (115 V) delle reti CA e CC o persino il passaggio a una rete 270 V CC a cui la batteria sarebbe direttamente collegata. Sembra di nuovo probabile che una tecnologia come Li-Ion sarà la più adatta a rispondere alle esigenze di tali sistemi di "aerei più elettrici", a causa del suo peso inferiore e del numero ridotto di celle necessarie per supportare una determinata tensione.

7.8 Batteria del caso di studio

7.8.1 Configurazione batteria

La batteria alla quale farà riferimento il modello che sarà descritto nel capitolo successivo è una batteria prodotta e distribuita dalla SAFT: si tratta di una batteria Ni-Cd Vented Sintered plate con P/N 407CH5. Nella seguente tabella sono riportati le specifiche della batteria in esame:

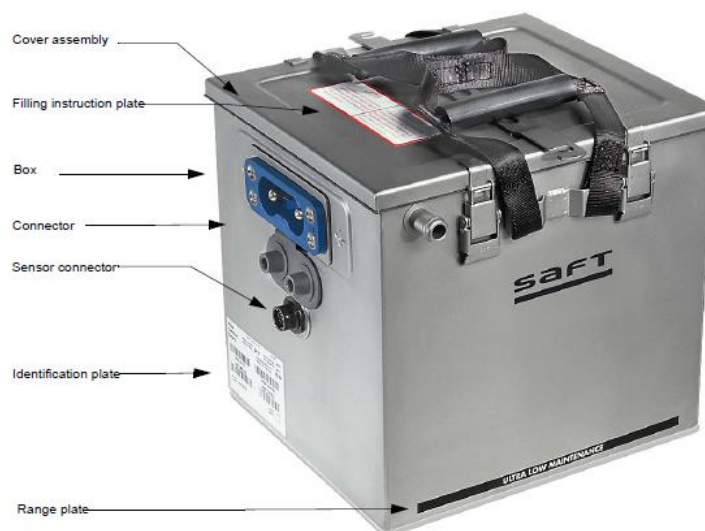


Figura 24 Batteria SAFT P/N 407CH5

<i>Numero di celle</i>	20
<i>Rated Capacity (C_1A)</i>	40
<i>Dimensioni [mm^3]</i>	268,4x300x262
<i>Peso [kg]</i>	34,8

Tabella 2 Dati batteria SAFT P/N 407CH5

Tale batteria può essere utilizzata:

- Per attivare il motore, o l'APU
- Al suolo, per fornire energia prima che venga fornita energia elettrica al velivolo
- In volo, in caso di malfunzionamento o guasto del sistema di generazione di energia elettrica

Essa è costituita da un box metallico contenente al suo interno un numero pari a 20 celle. Queste ultime sono connesse in serie per ottenere uno specifico voltaggio richiesto, in particolare un valore di tensione nominale pari a 24 V. Le celle sono le componenti attive della batteria: rappresentano il luogo dove avvengono le reazioni elettrochimiche che convertono energia chimica in elettricità.

Gli elettrodi appartengono alla categoria Sintered Plate: il positivo è impregnato con $Ni - H_2$, mentre il negativo con $Cd - H_2$. Nella singola cella entrambi gli elettrodi sono immersi in elettroliti, una soluzione di idrossido di potassio e acqua.

7.8.2 Temperature di utilizzo

La batteria presentata riesce ad operare in maniera ottimale nel range di $5^\circ \div 45^\circ C$. La carica risulta inefficiente a temperature al di sotto di $-30^\circ C$. Inoltre essa deve essere arrestata quando si supera la temperatura di $71^\circ C$.

7.8.3 Metodi di Carica

La procedura di carica va applicata quando la batteria è completamente scarica. Se non si conoscesse lo stato di carica, bisognerà scaricarla con una corrente costante di $1C_1A$, fin quando il voltaggio scende fino a 1V/cella. Possono essere adottati tre diverse metodologie di ricarica come riportato in tabella:

Main Charge			Final Charge	
Current	Minimum Duration	End of main charge	Current and time	Minimum voltage
0,1 C_1A	10 h	Every cell >1,5 V or 12 which ever comes first	0,1 C_1A for 4h	1,5 V/Cell or 1,55V/cell
0,5 C_1A	2 h	Every cell >1,5 V or 12 which ever comes first	0,1 C_1A for 4h	1,5 V/Cell or 1,55V/cell
1 C_1A	1h	Every cell >1,5 V or 12 which ever comes first	0,1 C_1A for 4h	1,5 V/Cell or 1,55V/cell

Tabella 3 Metodi di ricarica

In caso di emergenza si possono usare diverse procedure di ricarica per ottenere un 80% della capacità nominale.

7.8.4 Manutenzione

Nel manuale di manutenzione della batteria sono descritte le procedure di mantenimento e i test funzionali che devono essere eseguiti sulla batteria in volo e a terra per garantire l'integrità della stessa.

Vi sono diversi step da seguire:

- Check periodici: controllo e regolazione livelli degli elettroliti;
- Check regolari: Test capacità e check periodici;

- Overhaul generali: disassemblaggio, pulizia completa, riassettaggio e check regolare.

Nel seguente flow chart sono mostrate le operazioni da eseguire per quanto riguarda un overhaul generale:

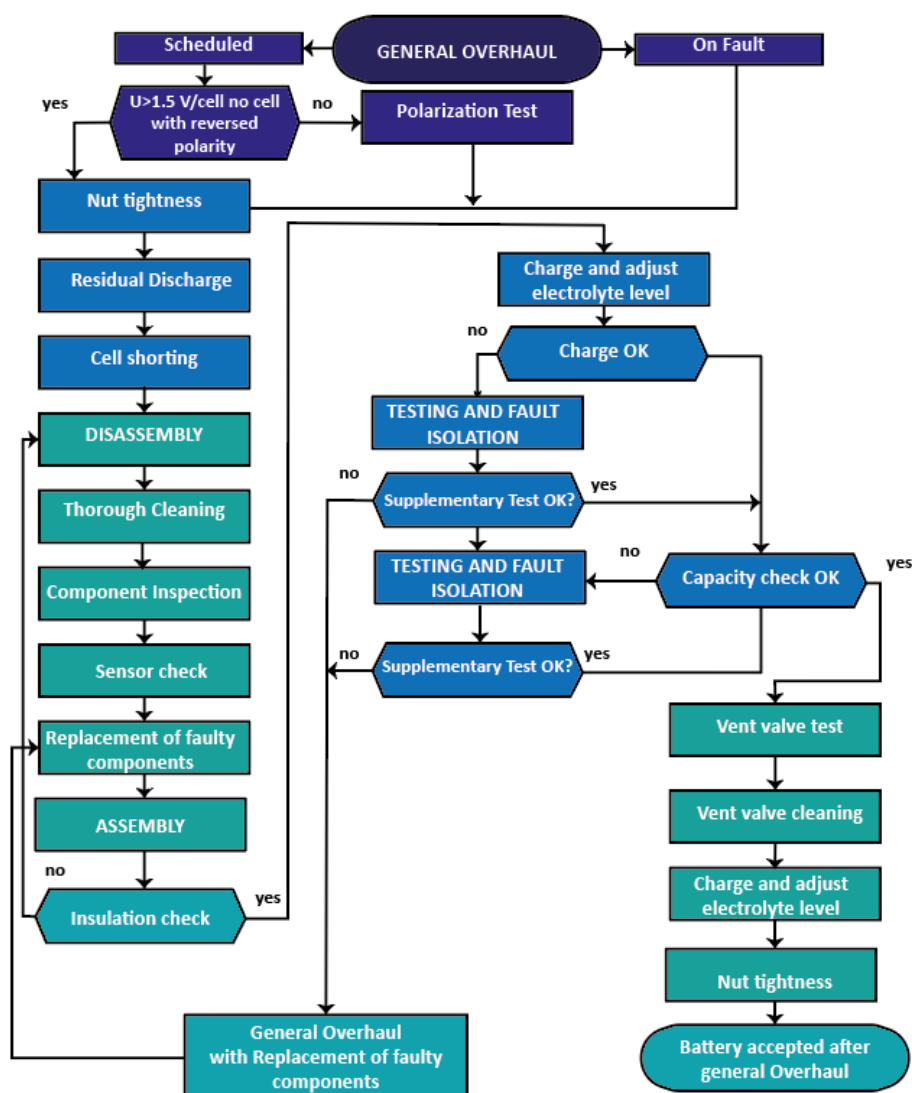


Figura 25 FlowChart Overhaul

Tale procedura è effettuata con cadenza annuale. Se la batteria non dovesse passare tale ispezione, o si procede con la rimozione e sostituzione delle singole celle o, nei casi più estremi, viene rimossa completamente la batteria. In particolare se:

- In una o più celle si ha esito negativo del check e già 5 delle celle originali erano state sostituite la batteria deve essere rimossa e scartata;
- Se 3 o più celle risultano contemporaneamente in fault durante lo stesso check la batteria viene scartata.

8 MODELLO BATTERIA

8.1 Generalità

La gestione della batteria viene generalmente implementata per due scopi principali. Uno è quello di ottimizzare le prestazioni della batteria e l'altro per mitigare i rischi per la sicurezza. Un tipico sistema di gestione può innanzitutto comportare il monitoraggio di caratteristiche di base come pressione, temperatura, tensione o corrente per i valori preimpostati al fine di proteggere la cella dal funzionamento al di fuori dei limiti stabiliti dal produttore.

Il livello successivo prevede la misurazione delle caratteristiche individuali della batteria per ottenere informazioni appropriate sulle condizioni attuali. Queste informazioni possono quindi essere utilizzate per attività più avanzate, come ad esempio:

- la visualizzazione locale della capacità
- la stima del tempo di funzionamento rimanente attraverso l'esecuzione di calcoli basati sulle misurazioni, ottenute da opportuni sensori, che possono fornire ulteriori dati aggiuntivi

In una batteria ricaricabile secondaria, la durata è spesso definita come la durata del ciclo della batteria. La quantità di cicli di carica/scarica completa, che ci si può aspettare prima che la batteria non possa più erogare l'80% della sua capacità originale, viene generalmente utilizzata come punto **End Of Life** (EOL).

La previsione della durata della batteria implica quindi la determinazione dell'invecchiamento e del degrado della batteria verso il punto EOL.

8.1.1 Previsione prestazioni

La previsione delle prestazioni di una batteria viene spesso eseguita mediante modellazione e simulazione sia analitica sia numerica.

Possono essere annoverati quattro approcci principali che vengono adottati per prevedere le prestazioni della batteria:

- Metodi empirici;
- Modelli elettrochimici basati sul primo principio;
- Tecniche di circuito equivalenti;
- Tecniche basate sull'intelligenza artificiale.

Ognuno di essi può anche incorporare tecniche stocastiche per produrre previsioni con analisi statisticamente significative.

L'obiettivo finale di qualsiasi modellazione e simulazione è ottenere una previsione affidabile delle prestazioni della batteria per un'applicazione specifica, riducendo al minimo i costi, i tempi e gli errori. Pertanto, è importante scegliere l'approccio e la tecnica più efficaci e adatti.

Per la progettazione di batterie o la prototipazione rapida, i modelli basati sui "primi principi" rappresenterebbero una buona scelta. Questi modelli elettrochimici di "primo principio" potrebbero però, essere troppo complicati da usare, dal momento che incorporano molti fattori tra cui configurazione geometrica, proprietà cinetiche/di trasporto e proprietà termodinamiche dei materiali e/o dei componenti delle celle, per renderli vicini alla realtà.

Un metodo che si presta in maniera adeguata alla previsione del comportamento di una batteria con dati empirici limitati, utilizza i cosiddetti modelli di "circuito equivalente" che emulano l'andamento realistico dei parametri caratterizzanti della batteria, imitando i suoi processi fisici e le reazioni elettrochimiche da una serie di componenti elettrici in un circuito. Questo metodo, che è più semplice nella costruzione del modello e richiede meno parametrizzazione rispetto a quelli basati sui modelli elettrochimici di "primo principio", ha la capacità di prevedere con precisione la batteria in diversi scenari operativi.

8.2 Analisi predittiva

Da quanto detto sopra è possibile dunque stimare tramite modellazione il comportamento della batteria nel tempo, in termini di State of Charge (SOC) e degrado della capacità, utili per la stima finale, della durata della vita della batteria in termini di Numero di cicli, e in particolare del parametro **Remaining Useful Life** (RUL) strumento necessario per la successiva analisi LCCA.

Il modello che sarà presentato utilizzerà un particolare strumento di analisi predittiva noto come filtro Kalman, utile per rilevare misure di sensori soggette a rumore. Per il modello è necessario considerare tali **IPOTESI DI PARTENZA**:

- Si utilizzano i dati della batteria SAFT descritta nel capitolo precedente;
- Si prevede la presenza di sensori capaci di rilevare temperatura, corrente e tensione della batteria in tempo reale;
- Vi è la presenza di un caricatore a bordo;
- La carica completa viene effettuata a terra;
- Il modello è molto semplificato (non si tiene conto dell'effetto memoria);
- Si assume un funzionamento continuo della batteria;
- Si assume che l'intera batteria sia composta da celle aventi tutte lo stesso comportamento.

8.3 Filtro di Kalman

Il filtro di Kalman è un algoritmo di stima ottimale, e può essere usato per stimare lo stato di un sistema quando non può essere misurato direttamente. Ad esempio, se si volesse monitorare la temperatura interna di un propulsore aerospaziale, direttamente tramite l'ausilio di appositi sensori, tale stima non sarà possibile, poiché non esistono tipologie di sensori che riescano a resistere a temperature tanto elevate quanto quelle che si raggiungono in camera di combustione. Per tale ragione la soluzione più efficace risulta essere quella di misurare la temperatura esterna e quindi, tramite l'utilizzo del Kalman Filter, stimare la temperatura interna attraverso una misura indiretta.

Nello specifico, quindi, si tratta di un filtro non lineare che è in grado di stimare in sequenza lo stato di un sistema dinamico usando una sequenza di misurazioni soggette a rumore effettuate sul sistema. Per la modellazione dei sistemi dinamici si adotta l'approccio Stato-Spazio e si presume che le misurazioni siano disponibili in tempi discreti.

Per approccio Stato-Spazio per la modellazione di serie temporali si pone l'attenzione sul vettore di stato di un sistema:

- **Il vettore di stato** contiene tutte le informazioni rilevanti richieste per descrivere il sistema in esame. Ad esempio in un problema di economia, tale vettore potrebbe essere correlato al flusso monetario, ai tassi di interesse, all'inflazione e così via.
- **Il vettore di misurazione** rappresenta osservazioni (rumorose) correlate al vettore di stato. Il vettore di misurazione è generalmente di dimensione inferiore rispetto al vettore di stato.

L'approccio stato-spazio è conveniente per la gestione di dati multivariati e processi non lineari/non gaussiani. Per analizzare un sistema dinamico, sono richiesti almeno due modelli:

- un modello che descriva l'evoluzione dello stato con il tempo (il sistema o modello dinamico);
- un modello relativo alle misure del rumore allo stato (il modello di misurazione).

Si ipotizza che tali modelli siano disponibili in forma probabilistica. La formulazione Stato-spazio probabilistica è il requisito per l'aggiornamento delle informazioni sulla ricezione di nuove misurazioni sono ideali per l'approccio **Bayesiano**.

Nell'approccio bayesiano per la stima di uno stato dinamico si cerca di strutturare la funzione di densità di probabilità posteriore (**PDF: Posterior probability Density Function**) dello stato, sulla base di tutte le informazioni disponibili, inclusa la sequenza delle misurazioni ricevute. Per questo motivo la PDF può essere considerata la soluzione completa al problema della stima.

Per molti problemi è necessaria una stima ogni volta che si riceve una misurazione. In questo caso l'utilizzo di un filtro ricorsivo può risultare una soluzione conveniente: i dati ricevuti possono essere elaborati in sequenza anziché in lotto, quindi non è necessario archiviare completamente il set di dati né rielaborarli. Tale filtro consiste essenzialmente di due fasi: **previsione** e **aggiornamento**.

- **La fase di previsione** utilizza il modello di sistema per prevedere lo stato pdf in avanti, da un tempo di misurazione a quello successivo. Poiché lo stato è generalmente soggetto a disturbi sconosciuti (modellati come rumore casuale), la previsione generalmente traduce, deforma e amplia lo stato pdf.
- **La fase di aggiornamento** utilizza l'ultima misurazione per modificare (in genere per stringere) il pdf di previsione. Questo si ottiene usando il teorema di Bayes, che è il meccanismo per aggiornare le conoscenze sullo stato target alla luce di ulteriori informazioni ottenute con i nuovi dati.

8.3.1 Introduzione al problema

Per definire il problema del filtro non lineare, introduciamo il vettore di stato target $x_k \in R^n$, dove n è la dimensione del vettore di stato; R è un insieme di numeri reali; $k \in N$ è l'indice del tempo; e N è l'insieme dei numeri naturali. Qui l'indice k è assegnato a un istante di tempo continuo t_k e all'intervallo di campionamento $T_{k-1} = t_k - t_{k-1}$ che può essere dipendente dal tempo (cioè una funzione di k). Lo stato target si evolve secondo il seguente modello stocastico a tempo discreto:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}, v_{k-1}) \quad (8.1)$$

dove f_{k-1} è una funzione nota, possibilmente non lineare, dello stato x_{k-1} e v_{k-1} viene definita sequenza del rumore di processo. Il rumore di processo si rivolge a qualsiasi effetto errato o disturbi

imprevisti nel modello di movimento del target. L'obiettivo del filtraggio non lineare è stimare ricorsivamente x_k dalle misurazioni $z_k \in R^n$. Le misurazioni sono correlate allo stato target tramite l'equazione di misurazione:

$$z_k = h_k(x_k, w_k) \quad (8.2)$$

dove h_k è una funzione nota, possibilmente non lineare, e w_k è una sequenza di rumore di misurazione. Le sequenze di rumore v_{k-1} e w_k saranno considerate bianche, con funzioni di densità di probabilità note e reciprocamente indipendenti. Si presume che lo stato target iniziale abbia un pdf noto $p(x_0)$ e sia indipendente dalle sequenze di rumore.

Si cerca di ottenere stime filtrate di x_k in base alla sequenza di tutte le misure disponibili, $Z_k = \{z_i, i = 1, \dots, k\}$ fino al tempo k . Da una prospettiva bayesiana, il problema è quantificare ricorsivamente un certo grado di credibilità allo Stato x_k al tempo k , prendendo valori diversi, dati i dati Z_k fino al tempo k . Pertanto, è necessario costruire il pdf posteriore $p(x_k|Z_k)$.

La densità iniziale del vettore di stato è $p(x_0) = p(x_0|Z_0)$, dove Z_0 è l'insieme di nessuna misura. Allora, in linea di principio, il pdf $p(x_k|Z_k)$ può essere ottenuto in modo ricorsivo dalle due fasi sopra menzionate: previsione e aggiornamento.

Supponiamo che il pdf richiesto al momento $k - 1$ sia disponibile. La fase di previsione implica l'uso del modello di sistema per ottenere la densità di previsione dello stato al tempo k tramite l'equazione di Chapman-Kolmogorov:

$$p(x_k|Z_{k-1}) = \int p(x_k|x_{k-1}) p(x_{k-1}|Z_{k-1}) dx_{k-1} \quad (8.3)$$

Il modello probabilistico dell'evoluzione dello stato $p(x_k|x_{k-1})$, è definita dall'equazione del sistema (1.1) e dalle statistiche note del passaggio k al momento in cui una misura z_k diventa disponibile, viene eseguita la fase di aggiornamento. Ciò comporta un aggiornamento del pdf di previsione (o precedente) tramite la regola di Bayes:

$$\begin{aligned} p(x_k|Z_k) &= p(x_k|z_k, Z_{k-1}) \\ &= \frac{p(z_k|x_k, Z_{k-1}) p(x_k|Z_{k-1})}{p(z_k|Z_{k-1})} \\ &= \frac{p(z_k|x_k) p(x_k|Z_{k-1})}{p(z_k|Z_{k-1})} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Dove la costante normalizzata è:

$$p(z_k|Z_{k-1}) = \int p(z_k|x_k) p(x_k|Z_{k-1}) dx_k \quad (8.5)$$

dipende dalla funzione di probabilità $p(z_k|x_k)$, definita dal modello di misurazione (8.2) e dalle statistiche note di w_k . Nella fase di aggiornamento (8.4), la misurazione z_k viene utilizzato per modificare la densità precedente per ottenere la densità posteriore richiesta dello stato corrente.

Le relazioni di ricorrenza (8.3) e (8.4) formano la base per la soluzione bayesiana ottimale. La conoscenza della densità posteriore $p(x_k|Z_k)$ consente di calcolare una stima dello stato ottimale rispetto a qualsiasi criterio.

Analogamente, una misura dell'accuratezza di una stima dello stato (ad es. Covarianza) può anche essere ottenuta da $p(x_k|Z_k)$. La propagazione ricorsiva della densità posteriore, data da (8.3) e (8.4), è solo una soluzione concettuale nel senso che in generale non può essere determinata analiticamente. L'implementazione della soluzione concettuale richiede la memorizzazione dell'intero pdf (non gaussiano) che è, in termini generali, equivalente a un vettore dimensionale infinito. Poiché nella maggior parte delle situazioni la soluzione analitica di (8.4) e (8.5) è intrattabile, si devono usare approssimazioni o **algoritmi bayesiani non ottimali**.

In alcuni problemi di filtraggio si devono affrontare i vincoli a priori imposti sul vettore di stato o sul processo di misurazione. Nel caso del tracciamento del bersaglio, ad esempio, potrebbero esserci forti vincoli sulla posizione del bersaglio (rotte di volo per velivoli commerciali), velocità o accelerazione. Anche i sensori possono avere dei limiti; ad esempio, i radar sono generalmente caratterizzati da determinate regioni di velocità cieca e dal rilevamento della linea di vista (quindi, non possono "vedere" dietro le montagne). Questi forti vincoli introducono non linearità sotto forma di troncamenti sulle distribuzioni di probabilità e complicano ulteriormente la derivazione analitica del filtro non lineare ottimale.

Analizzando nello specifico il filtro Kalman, esso presuppone che la densità posteriore in ogni momento sia gaussiana e quindi esattamente e completamente caratterizzata da due parametri, la sua media e la covarianza.

Se è $p(x_{k-1}|Z_{k-1})$ gaussiano, si può dimostrare che $p(x_k|Z_k)$ è anche gaussiano, a condizione che determinate ipotesi valgano:

- v_{k-1} e w_k sono tratte da densità gaussiane di parametri noti;
- $f_{k-1}(x_{k-1}, v_{k-1})$ è una funzione lineare nota;
- $h_k(x_k, w_k)$ è una funzione lineare nota;

Si dunque scrivere:

$$x_k = F_{k-1} x_{k-1} + v_{k-1} \quad (8.6)$$

$$z_k = H_k x_k + w_k \quad (8.7)$$

Dove F_{k-1} (della dimensione $n_x \times n_x$) e H_k (della dimensione $n_z \times n_x$) sono noti per definire le funzioni lineari. Sequenze casuali v_{k-1} e w_k sono gaussiane bianche a media zero reciprocamente indipendenti, con le covarianze Q_{k-1} e R_k rispettivamente. Si noti che il sistema e le matrici di misura, nonché le covarianze sul rumore possono essere varianti del tempo.

L'algoritmo del filtro Kalman, derivato usando (8.3) e (8.4), può quindi essere visto come la seguente relazione ricorsiva:

$$p(x_{k-1}|Z_{k-1}) = N(x_{k-1}; \hat{x}_{k-1|k-1}, P_{k-1|k-1}) \quad (8.8)$$

$$p(x_k|Z_{k-1}) = N(x_k; \hat{x}_{k|k-1}, P_{k|k-1})$$

$$p(x_k|Z_k) = N(x_k; \hat{x}_{k|k}, P_{k|k})$$

Dove $N(x, m, P)$ è una densità gaussiana con argomento x media m e covarianza P che è:

$$N(x, m, P) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi P|}} e^{-\frac{1}{2}(x-m)^T P^{-1}(x-m)} \quad (8.9)$$

I significati appropriati e le covarianze del Kalman sono calcolati come segue:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_{k-1} \hat{x}_{k-1|k-1} \quad (8.10)$$

$$P_{k|k-1} = Q_{k-1} + F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} + K_k S_k K_k^T$$

Dove

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (8.11)$$

È la covarianza del termine innovato

$$v_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (8.12)$$

E il guadagno di Kalman:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} + R_k \quad (8.13)$$

Si noti che la covarianza può essere scritta:

$$P_{k|k} = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} \quad (8.14)$$

Dove I è la matrice identità di ordine $n_x * n_x$

Il filtro di Kalman calcola in modo ricorsivo la media e la covarianza del posteriore gaussiano $p(x_k|Z_k)$. Questa è la soluzione ottimale al problema di tracciamento, se le ipotesi sono valide. L'implicazione è che nessun algoritmo potrà mai fare meglio del filtro Kalman in questo ambiente gaussiano lineare.

8.4 Filtri non lineari sub-ottimali

La realtà si manifesta spesso come molto complessa: non lineare, non gaussiana, non stazionaria e con stati target a valore continuo. Pertanto, nella maggior parte delle situazioni pratiche, i filtri non lineari ottimali non possono essere applicati, per cui si è costretti a usare approssimazioni o soluzioni non ottimali. Esistono un gran numero di algoritmi non ottimali, ma per il caso di studio da analizzare si fa riferimento al filtro Kalman Unscented (UKF) il quale utilizza un approccio di approssimazione tramite campionamento della densità a posteriore attraverso un piccolo numero di campioni scelti in modo deterministico.

8.4.1 Unscented Kalman filter

Il filtro Kalman Unscented (UKF), approssima la posteriore $p(x_k|Z_k)$ con una densità gaussiana, che è rappresentata da un insieme di punti campione scelti in modo deterministico. Questi punti campione, se propagati attraverso una trasformazione non lineare, catturano la vera media e la covarianza della densità gaussiana fino al secondo ordine di non linearità.

Questa tipologia di filtro viene chiamato Kalman a regressione lineare poiché è basato su una linearizzazione statistica piuttosto che su una linearizzazione analitica. La linearizzazione statistica viene eseguita tramite la regressione lineare attraverso i punti di campionamento.

8.4.2 Equazioni di filtraggio

Il filtro Kalman Unscented è usato quindi quando ci si trova davanti a problemi di sistemi non lineari con rumore additivo; cioè, per un caso speciale di (8.1) è indicato qui:

$$\begin{aligned} x_k &= f_{k-1}(x_{k-1}) + v_{k-1} \\ z_x &= h_k(x_k) + w_k \end{aligned} \quad (8.15)$$

L'assunzione da fare è che la densità posteriore al tempo $k-1$ è gaussiana:

$$p(x_{k-1}|Z_{k-1}) = N(x_{k-1}, \hat{x}_{k-1|k-1}, P_{k-1|k-1}).$$

Il primo passo è rappresentare questa densità con un insieme di N punti di campionamento X_{k-1}^i e i loro pesi $W_{k-1}^i = 0, \dots, N-1$. La fase di previsione viene quindi eseguita come segue:

$$\hat{x}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{N-1} W_{k-1}^i * f_{k-1}(X_{k-1}^i) \quad (8.16)$$

$$P_{k|k-1} = Q_{k-1} + \sum_{i=0}^{N-1} W_{k-1}^i [f_{k-1}(X_{k-1}^i) - \hat{x}_{k|k-1}][f_{k-1}(X_{k-1}^i) - \hat{x}_{k|k-1}]^T$$

La densità predetta $p(x_k|Z_{k-1}) \approx N(x_k, \hat{x}_{k|k-1}, P_{k|k-1})$ è rappresentata da un set N di punti di esempio:

$$X_{k|k-1}^i = f_{k-1}(X_{k-1}^i) \quad (8.17)$$

La misura predetta è dunque:

$$\hat{z}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{N-1} W_{k-1}^i h_k X_{k|k-1}^i \quad (8.18)$$

Lo step successivo è il seguente:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - \hat{z}_{k|k-1}) \quad (8.19)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k S_k K_k^T$$

Dove

$$K_k = P_{xz} S_k^{-1} \quad (8.20)$$

$$S_k = R_k + P_{zz}$$

$$P_{xz} = \sum_{i=0}^{N-1} W_{k-1}^i (X_{k-1}^i - \hat{x}_{k|k-1}) (h_k(X_{k-1}^i) - \hat{z}_{k|k-1})^T$$

$$P_{zz} = \sum_{i=0}^{N-1} W_{k-1}^i (h_k(X_{k-1}^i) - \hat{z}_{k|k-1}) (h_k(X_{k-1}^i) - \hat{z}_{k|k-1})^T$$

Si noti che non è necessario alcun calcolo esplicito dei giacobiani per attuare questo algoritmo. Di conseguenza tale filtro è applicabile anche in presenza di una discontinuità nelle funzioni non lineari f o h .

8.4.3 The Unscented Transform

L'UT è un metodo per calcolare le statistiche di una variabile casuale che subisce una trasformazione non lineare. Considerando di propagare una variabile casuale a , con media $\bar{a}$ e covarianza P_a , attraverso una funzione arbitraria non lineare $g: R^{n_a} \rightarrow R^{n_b}$, per produrre una variabile casuale b :

$$b = g(a). \quad (8.21)$$

I primi due momenti di b sono calcolati usando l'UT come segue. Innanzitutto, $2n_a + 1$ punti campione ponderati (A_i, W_i) sono scelti in modo deterministico in modo da descrivere (catturare) completamente la media reale $\bar{a}$ e la covarianza P_a di a . Uno schema che soddisfa questo requisito è:

$$\begin{aligned} A_0 &= \bar{a} & W_0 &= \frac{k}{(n_a + k)} & i &= 0 \\ A_i &= \bar{a} + \left(\sqrt{(n_a + k)P_a} \right)_i & W_i &= \frac{1}{2(n_a + k)} & i &= 1, \dots, n_a \\ A_i &= \bar{a} - \left(\sqrt{(n_a + k)P_a} \right)_i & W_i &= \frac{1}{2(n_a + k)} & i &= n_a + 1, \dots, 2n_a \end{aligned}$$

dove K è un parametro di ridimensionamento (tale che $K + n_a \neq 0$) ed $\left(\sqrt{(n_a + k)P_a} \right)_i$ è la riga i -esima della radice quadrata della matrice L di $(n_a + k)P_a$, tale che $(n_a + k)P_a = L^T L$.

I pesi sono normalizzati; cioè, devono soddisfare $\sum_{i=0}^{2n_a} W_i = 1$. Ora ogni punto campione viene propagato attraverso la funzione non lineare g :

$$B_i = g(A_i) \quad i = 0, 1, \dots, 2n_a$$

E i primi due momenti di b sono calcolati come segue:

$$\begin{aligned} \bar{b} &= \sum_{i=0}^{2n_a} W_i B_i \\ P_b &= \sum_{i=0}^{2n_a} W_i (B_i - \bar{b}) (B_i - \bar{b})^T \end{aligned} \quad (8.22)$$

Si può dimostrare che queste stime sono accurate al secondo ordine (terzo ordine se a è gaussiano) dell'espansione della serie di Taylor di $g(a)$. Si può affermare che la distanza dei punti campione $A_i, i = 1, \dots, n_a$ da a aumenta con la dimensione n .

8.5 Modellazione in Simulink e Simscape

Per la realizzazione del modello delle celle della batteria, presentata nel capitolo precedente, si è fatto uso di un modello sviluppato da Mathworks **“Nonlinear State Estimation of a degradation battery system”** per un’analisi non lineare che permetta di valutare lo SOC e l’andamento della capacità della batteria nel tempo grazie al filtro Kalman. Tale modello è stato poi adattato al caso di studio in esame per l’analisi della perdita di capacità di una Ni-Cd.

Il modello è stato sviluppato nell’ambiente Simulink e tramite l’utilizzo dell’ambiente Simscape sviluppato appositamente per modellazione di sistemi elettrici.

Il punto di partenza è la schematizzazione della cella tramite l’utilizzo del procedimento di “circuito equivalente”:

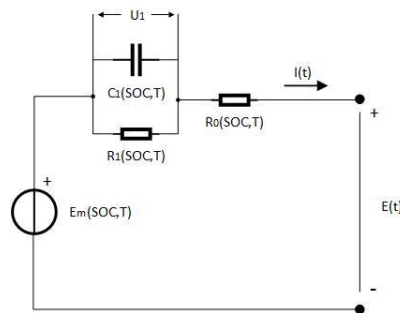


Figura 26 Circuito equivalente

Il circuito equivalente è composto da un generatore di potenza, un ponte RC contenente un resistore R_1 e un condensatore C_1 in serie con un resistore R_0 . Il modello simula il comportamento di tale batteria sottoposta a cicli completi divisi tra fase di scarica e fase di carica. Si possono ottenere le misure di SOC, e degrado della capacità a partire dai dati della misurazione di corrente, voltaggio e temperatura derivanti dai sensori. Si assume che la batteria sia un sistema non lineare e quindi lo SOC sarà valutato tramite l’ausilio del blocco del Filtro di Kalman Unscented, mentre per quanto riguarda la previsione della capacità, essendo quest’ultima pressoché lineare, si utilizza un Kalman Filter Lineare. Tale stima può essere utilizzata per indicare lo stato di vita della batteria, e in particolare risulterà necessaria per il calcolo della RUL.

La schematizzazione sopra riportata prende tale forma nell'ambiente Simulink:

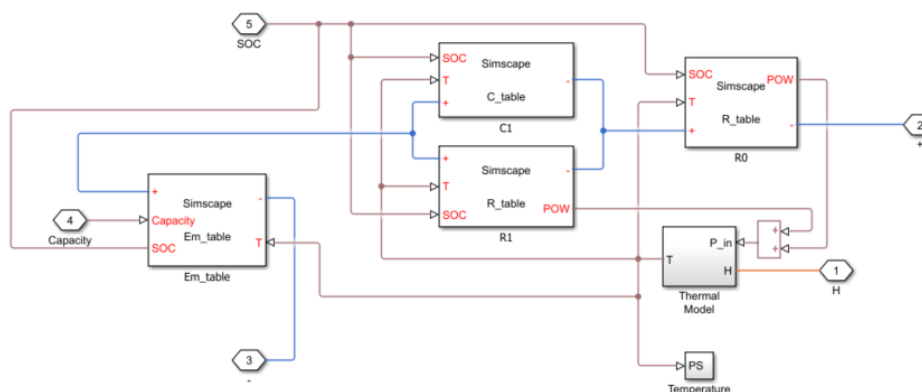


Figura 27 Circuito equivalente in Simscape

Si noti come tutti i componenti abbiano una dipendenza diretta dal valore di state of charge e dalla temperatura. Inoltre il generatore di potenza è dipendente anche dalla capacità.

Andando ad un livello superiore è possibile vedere lo schema della cella collegata ai vari sensori utili per la misurazione di corrente e voltaggio:

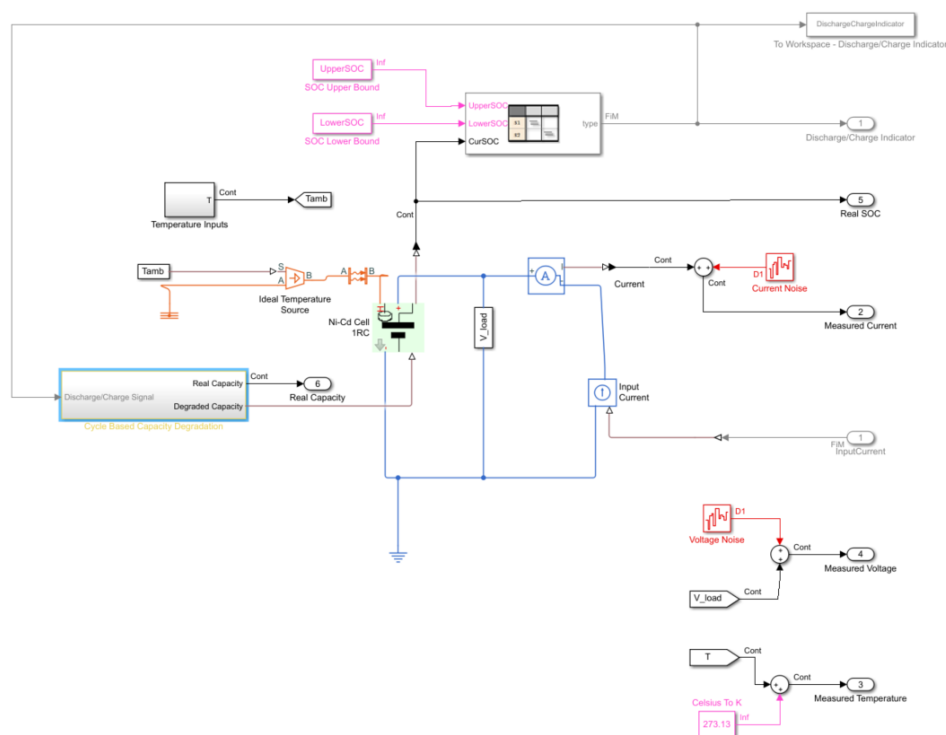


Figura 28 Blocco Degrading Battery

Da notare la presenza di un blocco logico che riceve in input i valori limiti della SOC (massimo 90% e minimo 30%) e il valore della SOC misurato dal modello della cella. Tale blocco serve per indicare la transizione da fase di scarica a fase di carica. L'output di tale blocco diventa l'input per il blocco di calcolo del degrado della capacità:

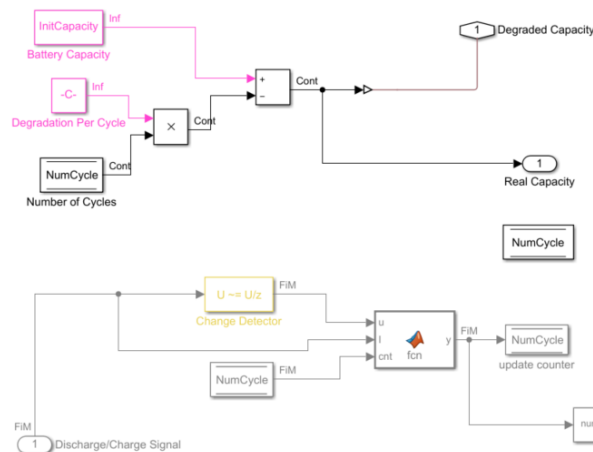


Figura 29 Blocco Cycled based degradation capacity

Sono presenti due schemi:

- Quello in basso riceve in input il segnale di carica e scarica, e tramite una semplice funzione di conteggio, crea l'output del numero di cicli. È presente un blocchetto aggiuntivo che riporta sul workspace una timeseries (tempo di simulazione, numero di cicli);
- Quello in alto riceve in input il valore della capacità iniziale posta pari a 40 Ah, e il prodotto tra il numero di cicli e il valore di degrado della capacità. In quest'ultimo blocco è stata inserita una variabile ("**degradazione**") che può essere modificata dal workspace di Matlab, vista la necessità di simulare diverse batterie di più velivoli con differenti valori di degrado. Tale blocco in output restituisce quindi la capacità stimata del modello della cella.

Lo schema finale risulterà quindi essere:

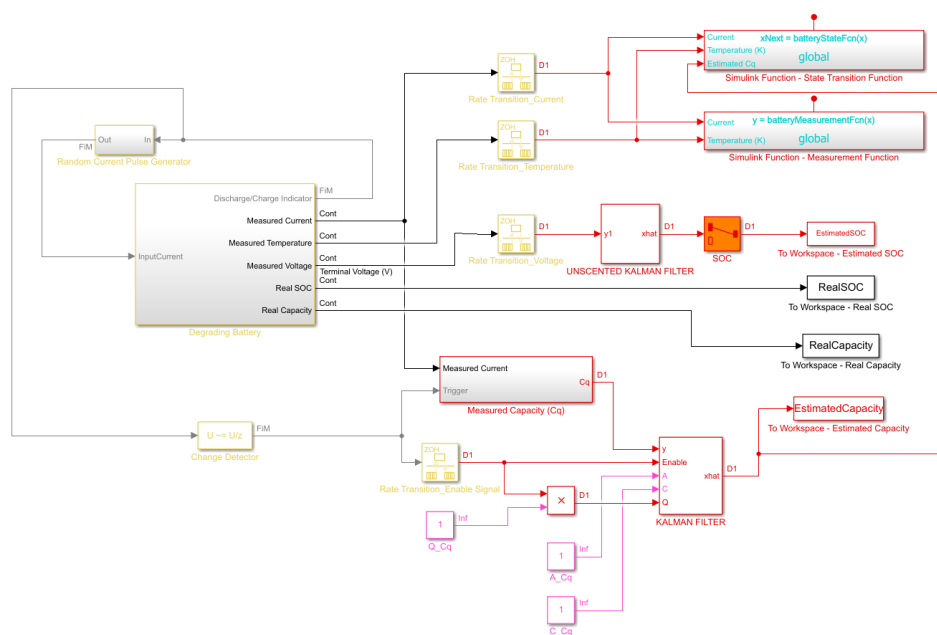


Figura 30 Modello Simulink completo

Il blocco degrading Battery contiene tutti i blocchi sopra illustrati e i suoi output diventano input per i due filtri di Kalman:

- Il Filtro di Kalman Unscented, restituisce in output la SOC Stimata;
- Il Filtro di Kalman lineare restituisce la Capacità Stimata;

Lanciando la simulazione dal workspace di Matlab è possibile ottenere i seguenti grafici (per semplicità grafica è stata lanciata una simulazione per 46000 s e per un degrado di 1 Ah a ciclo):

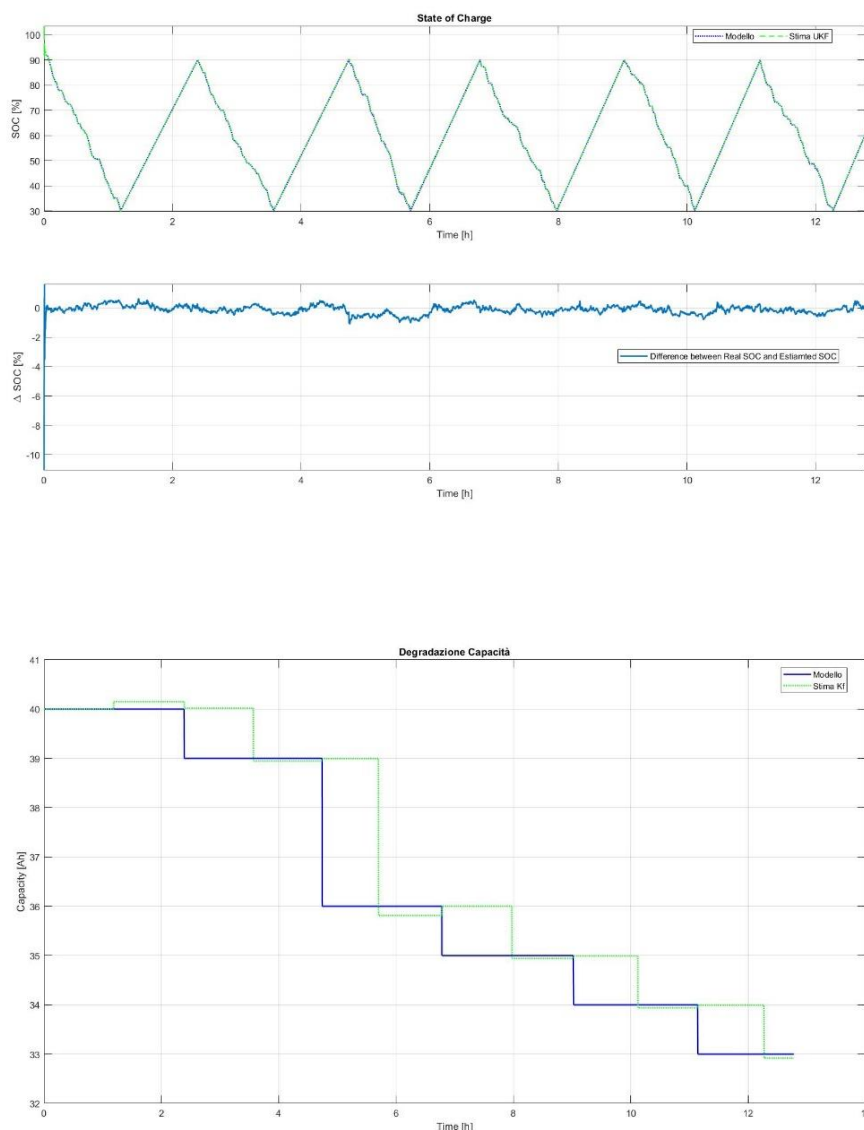


Figura 31 Grafici in output con Degradazione=1 Ah

Nel primo grafico è riportato l'andamento dello stato di carica della batteria e un confronto tra SOC del modello della cella rispetto ai valori stimati dal filtro UKF, mentre nel secondo è mostrato il confronto dell'andamento della capacità in funzione del tempo di simulazione tra i valori ottenuti dal modello e i valori ottenuti tramite l'utilizzo del filtro KF.

Si possono dunque effettuare le seguenti osservazioni:

- La curva dello SOC nella fase di scarica mostra un andamento non lineare visto che durante tale fase la corrente è stata assunta non costante. In contrasto con la fase di

carica nella quale la corrente è costante ed è stata impostata pari a 20 A, valore ottenuto dal manuale della batteria.

- Un ciclo scarica/carica completo ha una durata di 2 ore e 30 minuti.
- La curva della Stima UKF è praticamente sovrapposta, a meno di una fase iniziale di transitorio, alla curva della stima dello State of Charge del modello. Si nota infatti che la differenza tra le due curve oscilla attorno al valore di 0%.
- L'andamento della capacità stimata dal filtro KF riesce a tracciare correttamente l'andamento ottenuto tramite il modello. C'è un ritardo di mezzo ciclo tra la capacità stimata e la capacità reale, ciò è dovuto al fatto che il degrado della capacità della batteria si verifica quando termina un ciclo di scarica completa. Mentre il conteggio di coulomb nel filtro fornisce una misurazione della capacità dell'ultimo ciclo di scarica o carica.

In definitiva è possibile affermare che il modello sopra descritto e in particolare i filtri di Kalman, tenendo presente le ipotesi restrittive fatte inizialmente, riescono a descrivere il comportamento della cella.

Quindi appurata la validità del modello, è stato possibile procedere al lancio di diverse simulazioni con diversi gradi di perdita di capacità per la raccolta dati necessaria per l'analisi finale. Saranno analizzate 3 flotte di velivoli, ognuno dei quali contiene due batterie. Le flotte 1,2,3 sono composte rispettivamente da 8,6,4 velivoli, che saranno descritti con maggiore dettaglio nel capitolo successivo.

Nella figura sottostante sono riportati i grafici risultanti da una singola simulazione assumendo 0.023 Ah per ciclo come coefficiente di perdita di capacità:

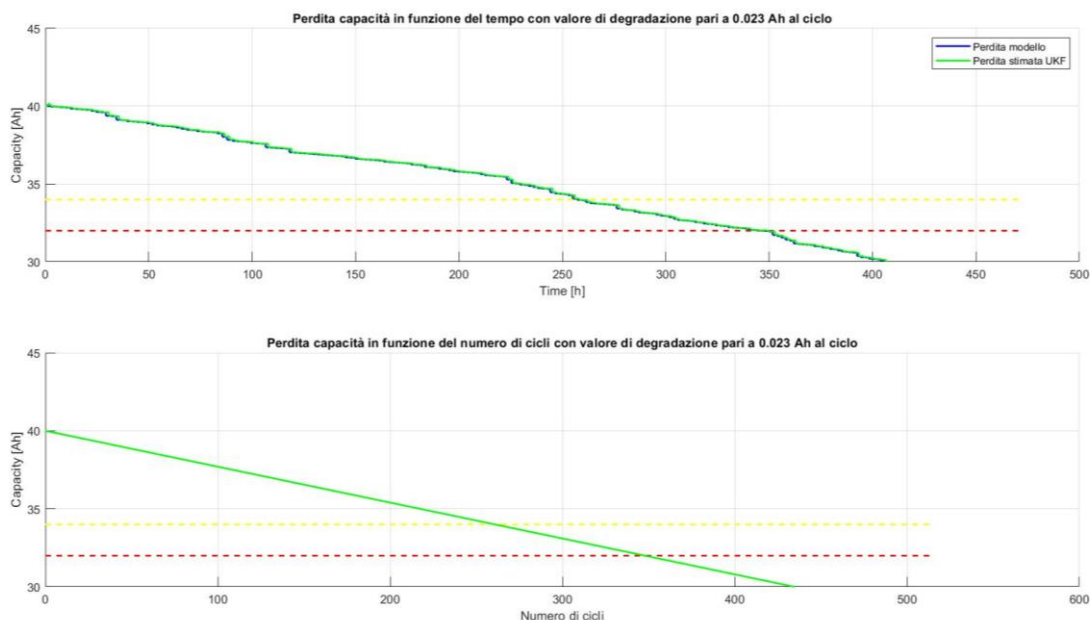


Figura 32 Grafici output modello modificato con Degradazione=0.023 Ah

Una maggiore attenzione deve essere prestata ai grafici soprariporati poiché oltre alla semplice curva che descrive la perdita di capacità in funzione del tempo, è stato aggiunto un grafico che traccia l'andamento della regressione lineare della curva Stima KF in funzione del numero di cicli di fondamentale importanza per la successiva stima della RUL. Inoltre si noti la presenza dell'aggiunta

di due curve di notevole rilevanza: **le rette tratteggiate, gialla e rossa**, corrispondono rispettivamente a una perdita del 15% e del 20% di capacità. Come, già discusso, la batteria deve essere rimossa quando si ha la perdita del 20% della sua capacità nominale, per tale ragione l'intersezione tra la curva rossa tratteggiata e la curva della stima UKF rappresenta il punto, espresso in ore, e in numero di cicli, in cui la batteria deve essere sostituita. Invece la curva gialla tratteggiata trova giustificazione nell'ottica seguente: supponendo di avere un sistema intelligente che monitori l'andamento della capacità in tempo reale, si è ipotizzato che raggiunto il valore del 15 %, quindi essendo prossimi al valore in cui la batteria dovrà essere sostituita, tale sistema generi un segnale di warning in cui si fa presente che la batteria dovrà, tra un determinato numero di cicli, essere sostituita.

Quindi ottenendo per ogni simulazione l'intersezione tra la curva della perdita di capacità in funzione dei numeri di cicli, e tali curve limite è stato possibile stimare per differenza la Remaining Useful Life:

$$RUL = N_{20\%} - N_{15\%}$$

Ulteriore ipotesi è stata adottata nel range di valori utilizzati come coefficienti di perdita di capacità. Da un set di velivoli in servizio, sono stati ricavati i dati di rimozione delle batterie in funzione del volato dei singoli velivoli. Dall'analisi di tali rimozioni è stato stimato un massimo e un minimo valore di perdita di capacità: tali valori sono compresi tra $0.023 \div 0.013 \text{ Ah per ciclo}$.

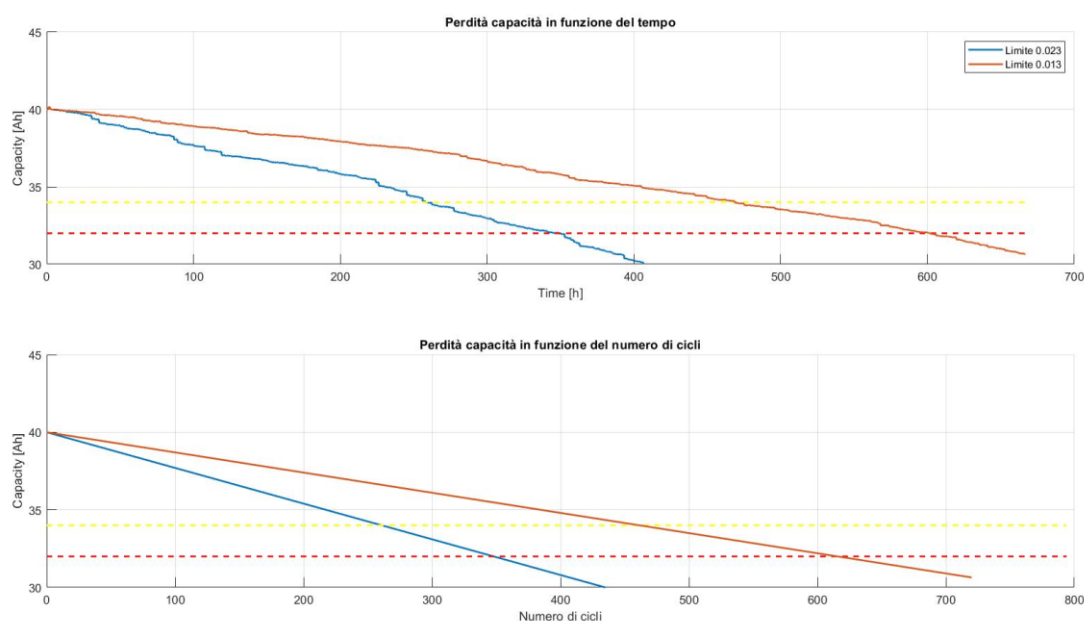


Figura 33 Valori limiti di degradazione

Sono state effettuate diverse simulazioni per ogni flotta, a diversi valori di degrado randomici, compresi nel range appena descritto, assegnati ad ogni velivolo. I grafici sono stati ottenuti utilizzando uno script Matlab che segue il sottostante Flowchart:

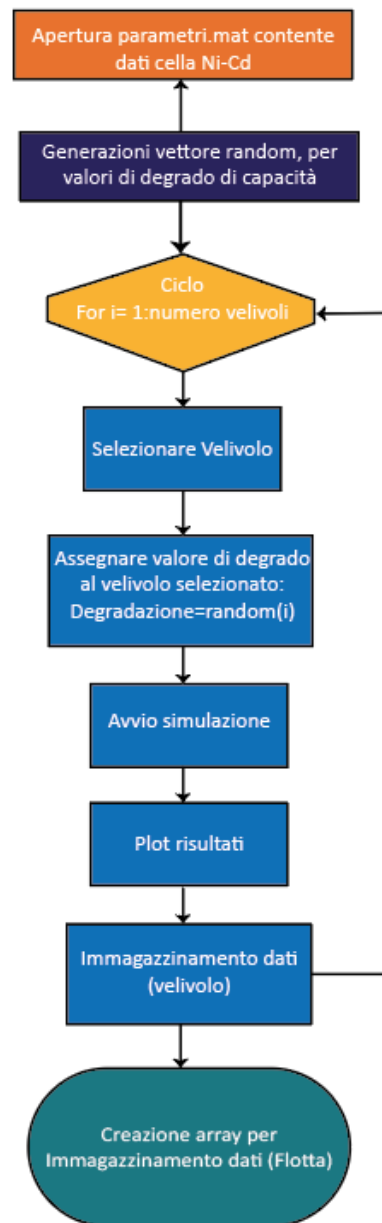


Figura 34 Flowchart generazione grafici mutipli Matlab

In figura vengono riportati i grafici di output derivanti da una simulazione per la flotta 2:

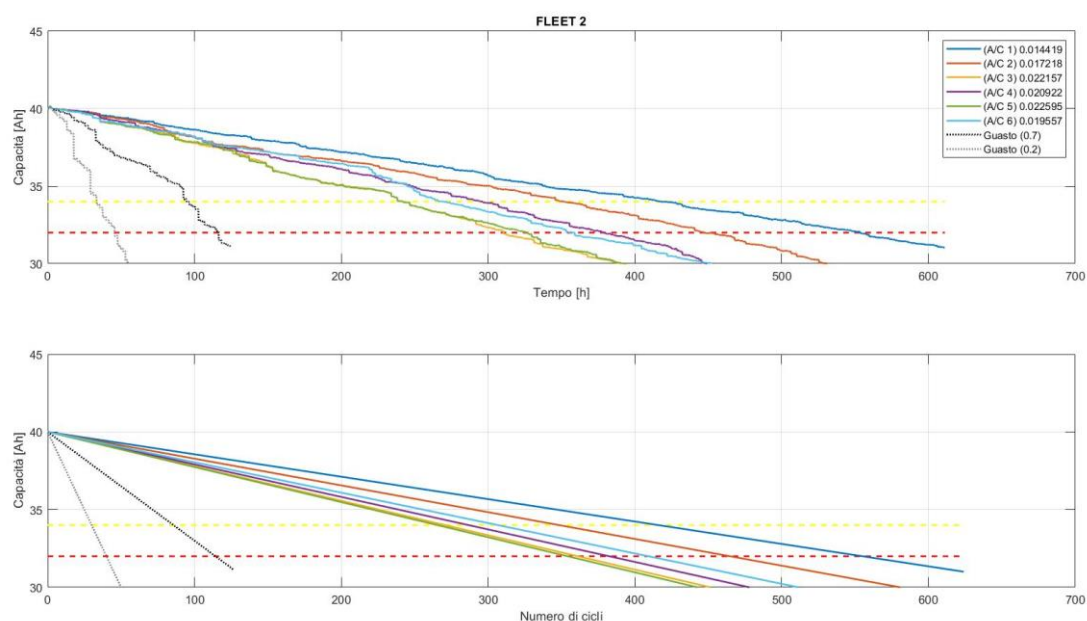


Figura 35 Simulazione completa Fleet 2

Da notare, oltre alle curve di ogni velivolo, la presenza delle curve punteggiate nera e grigia: esse descrivono il comportamento anomalo delle batterie, che per varie cause possono essere andate in avaria. Tali curve saranno dunque utilizzate per la simulazione di guasti randomici.

Al partire dai dati osservabili nelle seguenti tabelle, attraverso un'attenta analisi degli stessi, sono state scelte le batterie migliori in termini di valori di degrado e numero di cicli a fine vita che meglio si apprestano ad emulare, in maniera più realistica possibile, il comportamento di una batteria. Esse saranno poi utilizzate per ricreare lo Scenario Reale, del quale sarà effettuata la LCCA nel capitolo successivo.

In tabella sono mostrati i dati ottenuti per le 3 flotte per n simulazioni:

FLEET 1 (10 Simulazioni)

	A/C	SIMULAZIONE 1				SIMULAZIONE 2				SIMULAZIONE 3				SIMULAZIONE 4				SIMULAZIONE 5			
		Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
FLEET 1	A/C 3-1	0,016	376	501	125	0,0211	284	378	94	0,0226	266	354	88	0,0204	294	391	97	0,014	429	572	143
	A/C 3-2	0,0162	370	493	123	0,0221	272	363	91	0,0179	336	448	112	0,0169	355	472	117	0,0212	280	377	97
	A/C 3-3	0,0172	348	465	117	0,0142	420	560	140	0,021	285	381	96	0,0196	307	407	100	0,0199	301	402	101
	A/C 3-4	0,0181	331	441	110	0,0221	271	361	90	0,0144	415	555	140	0,0147	408	543	135	0,0162	373	493	120
	A/C 3-5	0,0198	303	404	101	0,0193	310	414	104	0,0172	348	464	116	0,0201	299	398	99	0,0225	266	355	89
	A/C 3-6	0,0196	307	409	102	0,014	429	572	143	0,0222	265	353	88	0,0133	450	600	150	0,0133	449	598	149
	A/C 3-7	0,0146	411	548	104	0,0179	335	447	112	0,0209	270	360	90	0,158	380	507	127	0,0174	345	461	116
	A/C 3-8	0,0227	264	352	143	0,0175	344	458	114	0,0227	264	352	143	0,0135	445	594	149	0,0168	357	476	119
	A/C	SIMULAZIONE 6				SIMULAZIONE 7				SIMULAZIONE 8				SIMULAZIONE 9				SIMULAZIONE 10			
		Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
FLEET 1	A/C 3-1	0,0207	290	387	97	0,0158	381	507	94	0,0226	265	354	89	0,0158	381	507	126	0,0189	265	354	89
	A/C 3-2	0,021	286	382	96	0,0162	373	493	120	0,0196	306	409	103	0,0198	303	404	101	0,0152	393	525	132
	A/C 3-3	0,0149	403	538	135	0,0225	266	355	89	0,0134	449	598	149	0,0196	307	409	102	0,0205	292	390	98
	A/C 3-4	0,0179	335	447	112	0,0185	325	432	91	0,158	380	507	127	0,0146	410	547	137	0,0156	385	514	129
	A/C 3-5	0,0175	344	458	114	0,0226	266	354	140	0,0215	279	373	94	0,0142	423	564	141	0,0181	332	443	111
	A/C 3-6	0,0195	308	411	103	0,0226	265	353	90	0,0223	268	358	90	0,018	333	445	112	0,02	300	400	100
	A/C 3-7	0,0201	298	398	100	0,0146	411	548	104	0,0198	304	407	103	0,0226	266	354	88	0,0219	273	365	92
	A/C 3-8	0,0205	292	389	97	0,0227	264	352	143	0,0206	303	404	101	0,0164	366	487	121	0,0226	318	424	106

Tabella 4 Simulazioni Flotta 1

FLEET 2 (8 Simulazioni)

	A/C	SIMULAZIONE 1				SIMULAZIONE 2				SIMULAZIONE 3				SIMULAZIONE 4			
		Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
FLEET 2	A/C 3-1	0,019	315	421	106	0,0211	284	378	94	0,0144	413	555	142	0,0134	445	599	154
	A/C 3-2	0,0201	294	400	106	0,0221	272	363	91	0,0172	350	464	114	0,0215	279	373	94
	A/C 3-3	0,0152	390	526	136	0,0142	420	557	137	0,0222	271	362	91	0,0223	268	358	90
	A/C 3-4	0,0142	423	561	138	0,0221	271	361	90	0,0209	287	382	95	0,0198	302	404	102
	A/C 3-5	0,0221	272	363	91	0,0193	310	414	104	0,0226	260	355	95	0,0206	291	389	98
	A/C 3-6	0,0142	420	560	140	0,014	429	572	143	0,0196	305	411	106	0,0204	294	391	97
	A/C	SIMULAZIONE 5				SIMULAZIONE 6				SIMULAZIONE 7				SIMULAZIONE 8			
		Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
FLEET 2	A/C 3-1	0,0169	352	472	120	0,0211	284	378	94	0,014	430	573	143	0,0146	409	547	138
	A/C 3-2	0,0196	306	408	102	0,0221	272	363	91	0,0158	378	507	129	0,0227	264	352	88
	A/C 3-3	0,0147	406	541	135	0,0142	420	560	140	0,0185	326	433	107	0,0226	266	354	88
	A/C 3-4	0,02	300	400	100	0,0221	271	361	90	0,0226	266	354	88	0,0179	335	449	114
	A/C 3-5	0,0133	451	599	148	0,0193	310	414	104	0,0226	265	353	88	0,021	288	384	96
	A/C 3-6	0,0158	380	504	124	0,014	429	572	143	0,0198	302	404	102	0,0158	378	507	129

Tabella 5 Simulazioni Flotta 2

FLEET 3 (8 Simulazioni)

		SIMULAZIONE 1				SIMULAZIONE 2				SIMULAZIONE 3				SIMULAZIONE 4			
FLEET 3	A/C	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
	A/C 1	0,0157	379	501	122	0,0221	265	356	91	0,0162	370	493	123	0,0222	268	357	89
	A/C 2	0,0185	325	431	106	0,0193	299	407	108	0,0211	279	376	97	0,0203	296	396	100
	A/C 3	0,0172	348	465	117	0,0139	424	571	147	0,0199	301	400	99	0,0179	337	450	113
	A/C 4	0,0142	423	561	138	0,0179	337	450	113	0,0215	278	375	97	0,0188	315	424	109
		SIMULAZIONE 5				SIMULAZIONE 6				SIMULAZIONE 7				SIMULAZIONE 8			
FLEET 3	A/C	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL	Degrado	N.C 15%	N.C 20%	RUL
	A/C 1	0,0211	285	383	98	0,0139	432	575	143	0,016	376	501	125	0,019	315	421	106
	A/C 2	0,022	271	362	91	0,0156	386	513	127	0,0162	370	493	123	0,0201	294	400	106
	A/C 3	0,0143	418	562	144	0,021	286	383	97	0,0172	348	465	117	0,0152	390	526	136
	A/C 4	0,0162	370	493	123	0,0133	451	601	150	0,0181	331	441	110	0,0142	423	561	138

Tabella 6 Simulazioni Flotta 3

9 ANALISI DATI

9.1 Generalità

Nel seguente capitolo sono illustrati i risultati di una LCCA condotta per due casi differenti:

- **Caso reale:** utilizzo della manutenzione preventiva e correttiva;
- **Caso Innovativo:** utilizzo della manutenzione predittiva.

Il seguente Use Case descrive un'analisi LCC limitata alle batterie Ni-Cd montate su un velivolo multi-ruolo di trasporto tattico, bimotore turboelica, in termini di:

- Costo di acquisizione spare parts;
- Costi di riparazione per manutenzione correttiva e overhaul;
- Costi del personale manutentivo per le attività inerenti alle operazioni di manutenzione sulla batteria.

Su ogni velivolo analizzato sono presenti 2 batterie (Quantity per Aircraft – QPA).

Il sistema di fornitura di potenza DC del velivolo, comprensivo delle batterie, può essere sintetizzato come segue: normalmente, la generazione di corrente DC è fornita da due **Transformer Rectifier Units** (TRU). Una terza TRU (STBY TRU) è utilizzata come fonte alternativa di potenza DC in caso di failure di una delle due fonti primarie.

In aggiunta sono presenti due batterie che svolgono le funzioni primarie come descritte nel capitolo 7.4.1: **la batteria di emergenza** (EMER BAT) e **l'APU start battery** (APU START BAT). La prima è utilizzata come back-up sul BUS di emergenza del velivolo, mentre la seconda è utilizzata per fornire potenza all'APU all'avvio e in caso di emergenza come back-up. Le due batterie sono caricate a voltaggio costante sul velivolo.

In condizioni di normale funzionamento, fatta eccezione per l'avvio dell'APU, il sistema di potenza DC è costituito da due canali indipendenti. Nel primo, la TRU 1 alimenta il DC BUS, e mantiene in carica l'EMER BAT. Il TRU 2 agisce su un secondo canale, mantenendo in carica l'APU START BAT. Le batterie hanno, tra le altre funzioni, quella di garantire sempre la continuità di potenza DC ai BUS durante la commutazione tra una sorgente di potenza e l'altra.

È prevista l'analisi per tre Flotte, con un totale di 18 A/C. I parametri operativi per lo scenario sono riassunti nella seguente tabella:

<i>Operational Parameters</i>	<i>U.M.</i>	<i>Fleet 1</i>	<i>Fleet 2</i>	<i>Fleet 3</i>
<i>A/C</i>	Qty	8	6	4
<i>Avg. FH/Year per A/C</i>	FH	300	250	300
<i>M.O.B. (Main Operating Base)</i>	Qty	1	1	1
<i>Support Period</i>	Years	10	9	8
<i>Avg. Mission Duration</i>	FH	1	1	1
<i>Ctr. Annual Fleet FH 1st year</i>	FH	1000	500	500
<i>Ctr. Annual Fleet FH</i>	FH	2400	1500	1200

Tabella 7 Parametri operativi Scenario

I parametri logistici, manutentivi e affidabilistici della batteria sono riassunti nella seguente tabella:

Battery	U.M.	All Fleets
P/N	-	407CH5
Quantity per A/C	Qty	2
Est. Battery degradation	Ah*Cycles-1	0.023 ÷ 0.013
Unit Spare Cost	€	8000
Standard Repair Cost	€	1500
Overhaul	€	3200
%Scheduled over Unscheduled	%	60
%Discard	%	20
Turnaround Time	Days	180
Lead Time	Days	Max 14
Avg. Annual Inflation Rate	%	1,4
Overhaul Check Frequency	Years	1
Removal and Installation Total Time	Minutes	10
Test	Minutes	60
MTBUR Predicted	FH	7200
Maintenance Cost per Hour	€	60

Tabella 8 Parametri logistici batteria

Si assume un Lead Time (tempo di approvvigionamento di nuove batterie) pari a 14 giorni, poiché si ipotizza che le tre Flotte possano accedere ad un *Buffer Stock*, ovvero un magazzino comune per l'acquisto delle Spare Parts, gestito direttamente dall'Azienda che garantisce il Supporto Logistico. Questo permette di ottenere i nuovi ricambi con un tempo sensibilmente ridotto rispetto all'acquisto diretto presso il Supplier.

Tramite un'analisi di mercato di batterie commerciali sono stati stimati tutti i costi e i parametri affidabilistici/prestazionali utili per l'analisi.

L'entrata in servizio dei velivoli è stata stimata come riassunto nella seguente tabella:

Delivery Plan & Flight activity in months												
	A/C	ENTRY INTO SERVICE	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
FLEET 1	AC1-1	01/01/2010	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-2	01/01/2010	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-3	01/01/2010	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-4	13/07/2010	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-5	15/07/2010	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-6	01/09/2011	0	4	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-7	03/10/2012	0	0	3	12	12	12	12	12	12	12
	AC1-8	07/01/2013	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12
FLEET 2	AC2-1	07/01/2011	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC2-2	07/01/2011	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC2-3	06/03/2011	0	10	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC2-4	06/03/2011	0	10	12	12	12	12	12	12	12	12
	AC2-5	15/09/2012	0	0	4	12	12	12	12	12	12	12
	AC2-6	08/09/2013	0	0	0	4	12	12	12	12	12	12
FLEET 3	AC3-1	28/10/2012	0	0	2	12	12	12	12	12	12	12
	AC3-2	28/10/2012	0	0	2	12	12	12	12	12	12	12
	AC3-3	25/01/2013	0	0	0	11	12	12	12	12	12	12
	AC3-4	10/01/2014	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12

Tabella 9 Entrata in servizio dei velivoli

Graficamente, il numero di velivoli per Flotta in funzione del periodo di supporto è schematizzabile come segue:

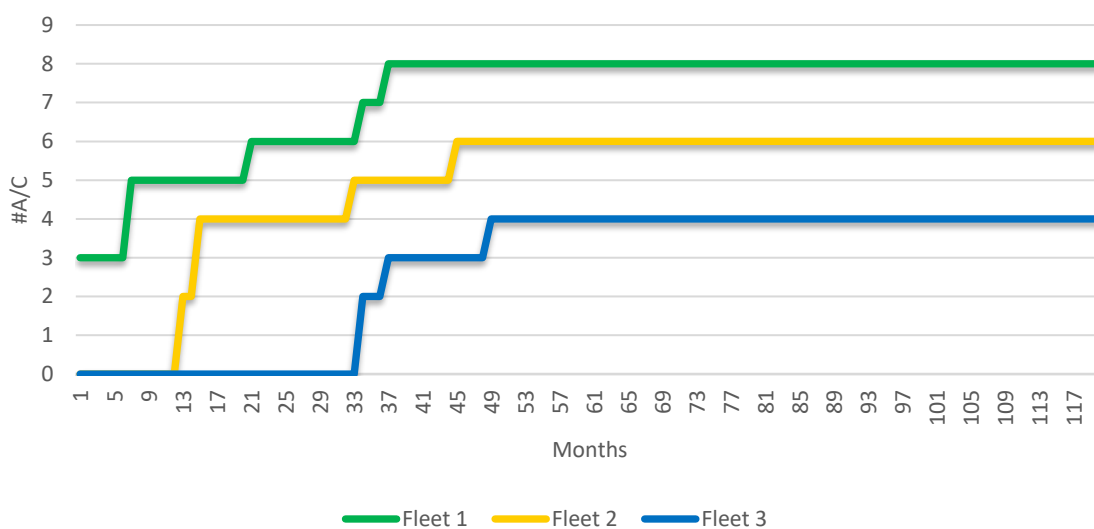


Figura 36 Entrata in servizio dei velivoli

Il volato annuale per velivolo, è stato ricavato dall'esperienza in servizio di velivoli analoghi a quello in esame:

		FH/YEAR per A/C									
	A/C	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
FLEET 1	AC1-1	186	379	391	427	364	439	316	371	153	482
	AC1-2	378	455	512	365	265	408	0	358	401	269
	AC1-3	210	469	487	396	115	434	0	489	179	243
	AC1-4	38	283	448	442	334	86	341	0	126	275
	AC1-5	20	396	311	456	347	40	444	425	199	231
	AC1-6	0	10	188	390	431	621	326	506	530	490
	AC1-7	0	0	60	243	382	340	629	280	365	351
	AC1-8	0	0	0	119	276	173	246	230	413	203
FLEET 2	AC2-1	0	141	150	181	225	164	176	169	119	134
	AC2-2	0	115	150	116	251	262	191	190	180	217
	AC2-3	0	69	256	376	326	176	219	219	127	154
	AC2-4	0	40	235	218	289	184	232	299	108	0
	AC2-5	0	0	51	119	174	388	305	411	495	195
	AC2-6	0	0	0	56	386	192	470	0	278	440
FLEET 3	AC3-1	0	0	53	177	100	110	265	459	212	263
	AC3-2	0	0	19	138	201	226	347	446	334	284
	AC3-3	0	0	0	100	240	280	283	84	306	314
	AC3-4	0	0	0	0	144	390	0	270	458	339

Tabella 10 Volato annuale

Di conseguenza, il volato per flotta indicativo per le analisi che seguono è riassunto nella seguente tabella:

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	FH/YEAR	832	1992	2397	2838	2514	2541	2302	2659	2366	2544
	FH/YEAR Cum	832	2824	5221	8059	10573	13114	15416	18075	20441	22985
Fleet 2	FH/YEAR	0	365	842	1066	1651	1366	1593	1288	1307	1140
	FH/YEAR Cum	0	365	1207	2273	3924	5290	6883	8171	9478	10618
Fleet 3	FH/YEAR	0	0	72	415	685	1006	895	1259	1310	1200
	FH/YEAR Cum	0	0	72	487	1172	2178	3073	4332	5642	6842

Tabella 11 Volato annuale cumulativo

9.2 Life cycle cost Analysis Scenario Reale

9.2.1 Eventi di Overhaul e manutenzione correttiva

La distribuzione degli eventi nel periodo di supporto è stata ricavata sul modello di eventi realmente verificatisi su categorie di velivoli analoghe a quelli in esame.

La distribuzione è riassunta nelle seguenti tabelle rispettivamente per eventi di Overhaul delle batterie e di rimozioni correttive (Unscheduled Removals – UR):

Overhaul	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1			1		3	1	2	3		
Fleet 2				1		2	2	1	1	
Fleet 3							2	1	1	

Tabella 12 Overhaul (Scenario Reale)

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	UR/YEAR	1	6	4	5	2	1	3	0	0	0
	UR/YEAR Cum	1	7	11	16	18	19	22	22	22	22
Fleet 2	UR/YEAR	0	0	4	1	3	1	0	1	0	0
	UR/YEAR Cum	0	0	4	5	8	9	9	10	10	10
Fleet 3	UR/YEAR	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0
	UR/YEAR Cum	0	0	0	2	4	5	6	6	6	6

Tabella 13 UR removal (Scenario Reale)

In funzione del valore ipotizzato di Discard al 20%, sono stati calcolati i discard annuali per Flotta nella seguente tabella, moltiplicando il valore di rimozioni correttive annuali (UR/YEAR) per 20% e riportando come discard tutti i risultati che arrotondati all'unità avessero un valore pari o superiore a 1.

Discard	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0
Fleet 2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Fleet 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 14 Discard (Scenario Reale)

9.2.2 Calcolo degli MTBUR In-Service

Utilizzando la seguente formula, è stato ricavato il valore di MTBUR (Mean Time Between Unscheduled Removals) per Flotta:

$$MTBUR = \frac{FH * QPA}{UR}$$

Funzione di:

1. **FH** cumulate della Flotta anno per anno
2. **Quantity per Aircraft** delle batterie sul velivolo (pari a 2)
3. Numero di **Unscheduled Removals** cumulato per Flotta anno per anno

I risultati sono riassunti nella seguente tabella:

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	MTBUR	1664	807	949	1007	1175	1380	1401	1643	1858	2090
Fleet 2	MTBUR	7200	7200	604	909	981	1176	1530	1634	1896	2124
Fleet 3	MTBUR	7200	7200	7200	487	586	871	1024	1444	1881	2281

Tabella 15 MTBUR (Scenario Reale)

In caso di mancanza di rimozioni correttive nei primi anni di esercizio, si assume di mantenere il valore di MTBUR Predicted.

9.2.3 Spare parts, Riparazioni, Overhaul e attività manutentiva

Initial Provisioning (first year after deployment)

Le spare parts necessarie al supporto della Flotta, sono state calcolate con la seguente formula:

$$Delta = \frac{TAT}{\left(\frac{MTBUR_{Predicted}}{24} * QPA\right)} + \left[\frac{TAT}{\left(\frac{MTBUR_{Predicted}}{24} * QPA\right)} * \% \frac{SR}{UR} \right]$$

Dove:

- **TAT** è il Turnaround Time in giorni
- **MTBUR_{Predicted}** è l'MTBUR predetto calcolato dal Supplier, diviso per 24 ore, in modo da essere espresso in giorni
- **QPA** è la Quantity per Aircraft
- La percentuale di Overhaul rispetto ad eventi correttivi è stata ipotizzata pari a 60%

Si assume che i costi associati agli Spare per l'Initial Provisioning, non rientrando nel computo del CPFH, non siano considerati per l'analisi.

Follow On Support (from 2nd year of support)

Per tutti gli anni successivi al primo, la formula per il delta Spare parts necessario al supporto della Flotta è stata calcolata come segue:

$$Delta = Scorte - \left[\frac{TAT}{\left(\frac{MTBUR}{24} * QPA\right)} + \frac{TAT}{\left(\frac{MTBUR}{24} * QPA\right)} * \% \frac{SR}{UR} \right]$$

Dove:

- **Scorte** rappresenta il numero di ricambi posseduti dal Cliente (in magazzino o in riparazione)
- **TAT** è il Turnaround Time in giorni
- **MTBUR** è l'MTBUR calcolato in servizio e riportato in Tabella 15, diviso per 24 ore, in modo da essere espresso in giorni
- **QPA** è la Quantity per Aircraft
- La percentuale di eventi Schedulati (Overhaul) rispetto ad eventi correttivi è stata ipotizzata pari a 60%

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella della pagina seguente. In caso di valori negativi alla voce Delta, si assume di acquistare un quantitativo di scorte pari al valore assoluto del

corrispondente valore Delta, arrotondato all'unità. Tale quantitativo è indicato nella riga Da Acquistare. Nella riga Da Reintegrare sono invece indicate le unità da acquistare per reintegrare le parti oggetto di DISCARD. Si assume che ad ogni unità scartata, indipendentemente dalle scorte presenti a magazzino, si proceda con il reintegro.

La somma delle unità Da Acquistare e Da Reintegrare indica il numero di spare da riapprovvigionare:

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Tot
Fleet 1	Delta	0,5	-1	-2	0	1	1	1	2	2	2	
	Scorte	1,0	2,0	4,0	4	4	4	4	4	4	4	
	Da acquistare	1	2									3
	Da reintegrare		1	1	1			1				4
	Acq+Rein	1	3	1	1	0	0	1	0	0	0	7
Fleet 2	Delta		0,5	1	-5	2	2	3	4	4	4	
	Scorte		1	1	6	6	6	6	6	6	6	
	Da acquistare			5								5
	Da reintegrare			1		1						2
	Acq+Rein	0	0	6	0	1	0	0	0	0	0	7
Fleet 3	Delta			0,5	1	-6	1	1	2	3	3	
	Scorte			1	1	7	5	5	5	5	5	
	Da acquistare				6							6
	Da reintegrare											0
	Acq+Rein	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6

Tabella 16 Spare Parts (Scenario Reale)

In funzione del costo annuale dello spare, ipotizzato incrementato annualmente del valore di inflazione indicato in *Tabella 8*, il costo per le spare parts per Flotta è riportato di seguito:

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Costo Spare	8000	8112	8226	8341	8457	8576	8696	8818	8941	9066	TOT
Fleet 1	8000	24336	8226	8341	0	0	8696	0	0	0	57598
Fleet 2			49353	0	8457	0	0	0	0	0	57811
Fleet 3				50044	0	0	0	0	0	0	50044

Tabella 17 Costo Spare Parts (Scenario Reale)

Allo stesso modo, in funzione del numero di UR annuali, sono stati ricavati i costi per le riparazioni per flotta:

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
UR Repair Cost	1500	1521	1542	1564	1586	1608	1630	1653	1676	1700	TOT
Fleet 1	1500	7605	4627	6256	3172	1608	3261	0	0	0	28028
	1500	9105	13732	19987	23159	24767	28028	28028	28028	28028	
Fleet 2	0	0	13881	6256	6343	1608	0	0	0	0	28087
	0	0	13881	20136	26479	28087	28087	28087	28087	28087	
Fleet 3	0	0	0	12511	12686	1608	0	0	0	0	26805
	0	0	0	12511	25197	26805	26805	26805	26805	26805	

Tabella 18 Costo UR repair (Scenario Reale)

I valori di costi di riparazione cumulati per Flotta sono rappresentati nel seguente grafico:

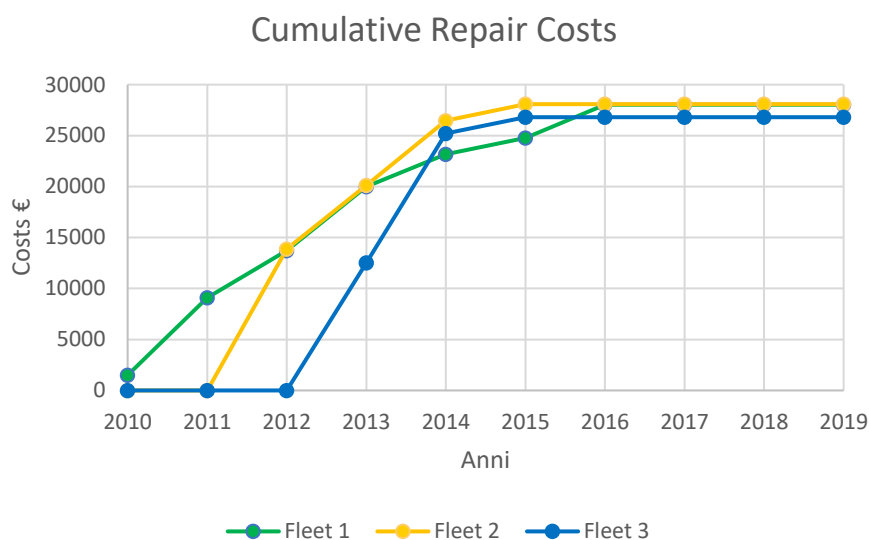


Figura 37 Cumulative Repair Costs

Allo stesso modo i costi per gli overhaul sono riportati nella seguente tabella:

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Overhaul	3200	3245	3290	3336	3383	3430	3478	3527	3576	3627	TOT
Fleet 1	0	0	3290	0	10149	3430	6957	10581	0	0	34408
	0	0	3290	3290	13439	16870	23826	34408	34408	34408	
Fleet 2	0	0	0	3336	0	6861	6957	3527	3576	0	24257
	0	0	0	3336	3336	10197	17154	20681	24257	24257	
Fleet 3	0	0	0	0	0	0	6957	3527	3576	0	14060
	0	0	0	0	0	0	6957	10484	14060	14060	

Tabella 19 Costi Overhaul

Graficamente, i costi di overhaul cumulati per Flotta sono riportati di seguito:

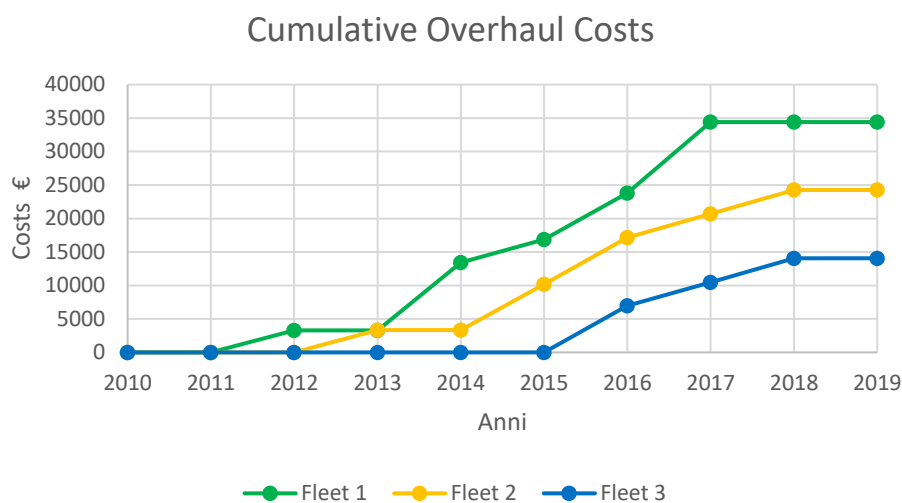


Figura 38 Cumulative Overhaul Costs

Sono stati calcolati i costi per test schedulati annuali, in funzione della seguente formula:

$$\text{Costo SM} = \sum_1^{\text{\#AC per Flotta}} \text{Costo orario} * \text{QPA controllate} * \left(\text{tempo} \frac{\text{installazione}}{\text{rimozione}} + \text{test} \right) / 60$$

I risultati dei costi cumulati annuali sono riportati nel seguente grafico:

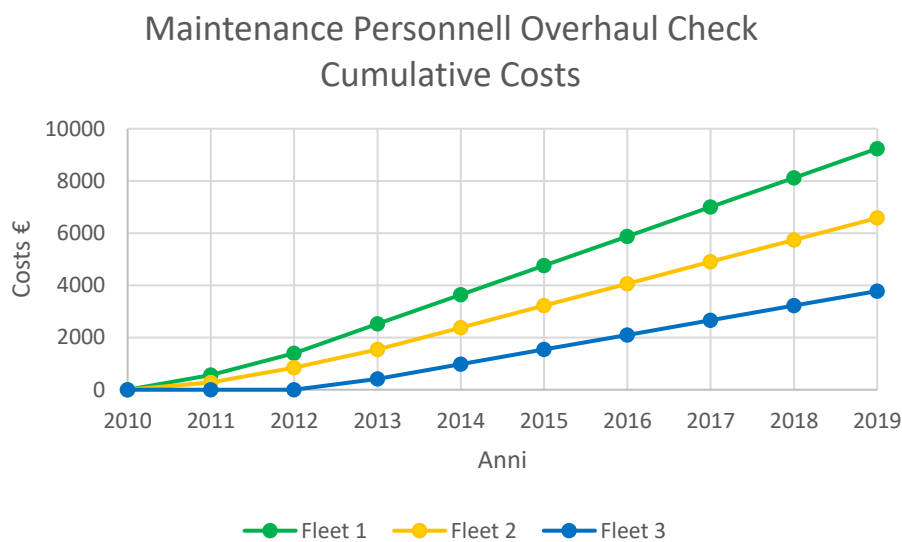


Figura 39 Maintenance Personnell Overhaul Check Cumulative Costs

In questi test schedulati sono compresi gli eventi di Overhaul riportati in *Tabella 12*.

I costi, analoghi, per le attività correttive, sono stati calcolati con la seguente formula:

$$\text{Costo UR} = \sum_1^{\text{\#AC per Flotta}} \text{Costo orario} * \text{UR} * \left(\text{tempo} \frac{\text{installazione}}{\text{rimozione}} + \text{test} \right) / 60$$

I risultati dei costi cumulati annuali sono riportati nel seguente grafico:

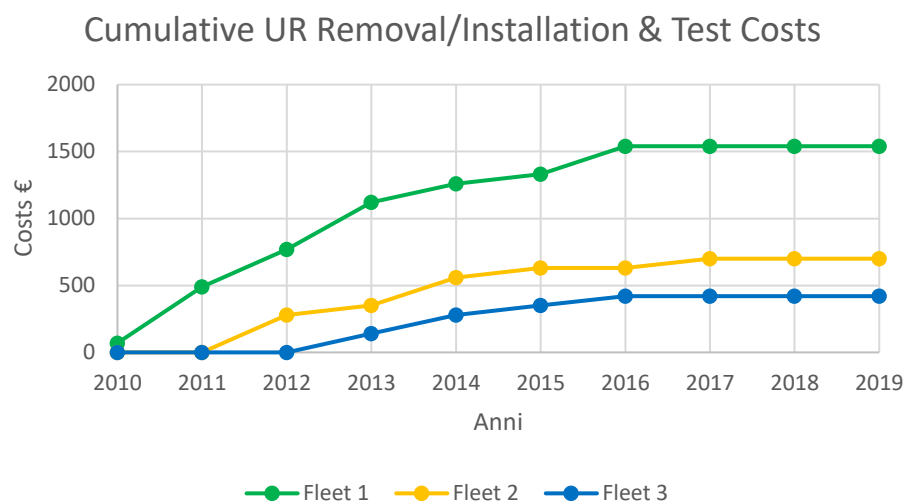


Figura 40 Cumulative UR Removal/Installation & Test Costs

9.2.4 Conclusioni scenario Real

In conclusione, i singoli costi delle tre Flotte possono essere calcolati in funzione delle FH del periodo di osservazione, permettendo di ottenere il **Costo per Flight Hour** (CPFH) riportato nella seguente tabella:

CPFH	Spare	UR Repair Costs	Overhaul	Personnell SM	Personnell UR	TOT
Fleet 1	2,5	1,22	1,50	0,40	0,07	5,7
Fleet 2	5,4	2,65	2,28	0,62	0,07	11,1
Fleet 3	7,3	3,92	2,06	0,55	0,06	13,9

Tabella 20 CPFH (Scenario Reale)

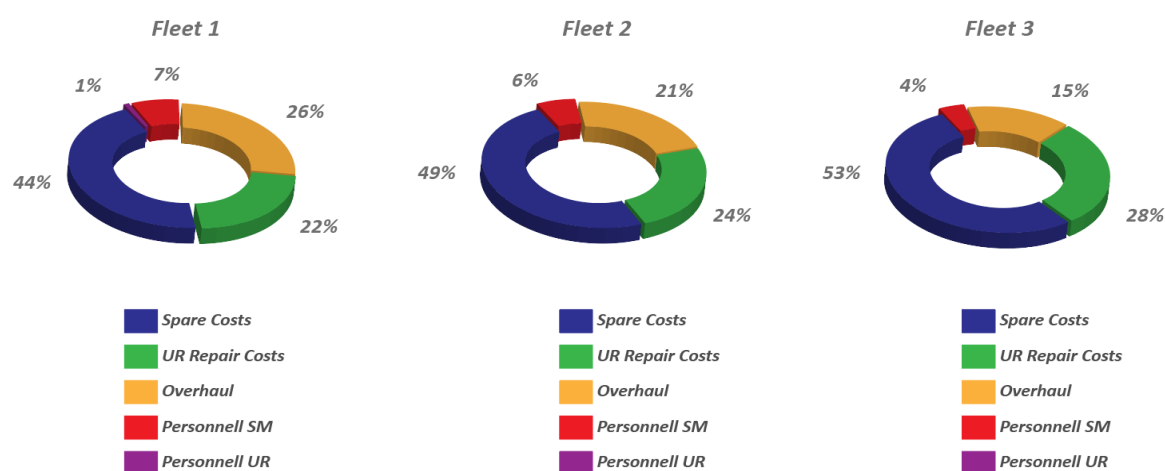


Figura 41 Costi Totali per flotta (Scenario Reale)

Si evidenzia quindi come i costi maggiori siano legati, mediamente, all'approvvigionamento delle parti e agli overhaul, intesi sia come somma dei costi effettivi di overhaul delle parti e dei costi del personale per le attività di controllo schedate, le quali non necessariamente conducono all'effettiva sostituzione della parte.

9.3 Life Cycle Cost Scenario Innovativo

Partendo dai dati di riferimento delle flotte e dalle simulazioni svolte nel capitolo precedente, si è ipotizzato uno scenario innovativo dove, grazie all'utilizzo di un software basato sul modello precedentemente descritto, è stato possibile conoscere l'andamento in tempo reale della capacità della batteria durante tutto il volato annuale per ogni flotta. Utilizzando i dati in output ottenuti dalle simulazioni si è cercato di riprodurre l'intero scenario reale, con il fine di mostrare il grande impatto della conoscenza della RUL e quindi dell'applicazione della manutenzione predittiva sui tempi e sui costi di approvvigionamento.

Fleet 1

Si parte dalla stima delle ore di volo cumulative per singolo velivolo come riportate in tabella:

	CUMULATIVO ORE DI VOLO									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
AC1-1	186	565	956	1383	1747	2186	2502	2873	3026	3508
AC1-2	378	833	1345	1710	1975	2383	2383	2741	3142	3411
AC1-3	210	679	1166	1562	1677	2111	2111	2600	2779	3022
AC1-4	38	321	769	1211	1545	1631	1972	1972	2098	2373
AC1-5	20	416	727	1183	1530	1570	2014	2439	2638	2869
AC1-6	0	10	198	588	1019	1640	1966	2472	3002	3492
AC1-7	0	0	60	303	685	1025	1654	1934	2299	2650
AC1-8	0	0	0	119	395	568	814	1044	1457	1660

Tabella 21 Cumulativo ore di volo per singolo velivolo

Nella tabella seguente sono mostrate le batterie montate su ogni velivolo (scelte come discusso nel capitolo precedente):

		DATI BATTERIE											
		GRUPPO 1			GRUPPO 2			GRUPPO 3			GRUPPO 4		
		degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	0,035	162	230	0,0133	449	598	0,0135	445	594	0,0204	294	391
	Batteria 2	0,0162	370	493	0,0142	423	564	0,0146	410	547	0,0198	303	404
A/C 2	Batteria 1	0,045	132	178	0,035	162	230	0,0149	403	538	0,0172	348	465
	Batteria 2	0,0181	331	441	0,0147	408	543	0,0179	335	447	0,021	286	382
A/C 3	Batteria 1	0,15	40	53	0,0201	299	398	0,0175	344	458	0,016	376	501
	Batteria 2	0,04	151	200	0,0133	450	600	0,0195	308	411	0,018	333	445
A/C 4	Batteria 1	0,035	162	230	0,0142	420	560	0,0201	298	398	0,0226	266	354
	Batteria 2	0,05	119	160	0,04	151	200	0,0135	445	594	0,0164	366	487
A/C 5	Batteria 1	0,0193	310	414	0,04	151	200	0,0144	415	555	0,0189	265	354
	Batteria 2	0,035	162	230	0,0152	393	525	0,0133	449	598	0,0185	325	432
A/C 6	Batteria 1	0,035	162	230	0,014	429	572	0,0133	450	600	0,0205	292	390
	Batteria 2	0,0156	385	514	0,0162	373	493	0,0175	344	458	0,0179	336	448
A/C 7	Batteria 1	0,035	162	230	0,0172	348	464	0,021	285	381	0,0181	332	443
	Batteria 2	0,045	132	178	0,0133	449	598	0,0133	449	598	0,02	300	400
A/C 8	Batteria 1	0,05	119	160	0,158	380	507	0,0226	265	354	0,0219	273	365
	Batteria 2	0,06	100	130	0,0142	423	564	0,0196	306	409	0,0226	318	424

Tabella 22 Batterie scelte

Le caselle in rosso stanno ad indicare batterie nelle quali si verificheranno guasti con rateo di degrado superiore al range stabilito nel capitolo precedente. I valori di avviso e rimozione sono stati moltiplicati per 2,5 considerando che un ciclo completo corrisponde a 2,5 FH.

		DATI BATTERIE*2,5 FH							
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3		GRUPPO 4	
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	405	575	1123	1495	1113	1485	735	978
	Batteria 2	925	1233	1058	1410	1025	1368	758	1010
A/C 2	Batteria 1	1008	1345	405	575	330	445	870	1163
	Batteria 2	828	1103	1020	1358	838	1118	715	955
A/C 3	Batteria 1	748	995	100	133	860	1145	940	1253
	Batteria 2	378	500	1125	1500	770	1028	833	1113
A/C 4	Batteria 1	405	575	1050	1400	745	995	665	885
	Batteria 2	298	400	378	500	1113	1485	915	1218
A/C 5	Batteria 1	775	1035	378	500	1038	1388	663	885
	Batteria 2	405	575	983	1313	1123	1495	813	1080
A/C 6	Batteria 1	405	575	1073	1430	1125	1500	730	975
	Batteria 2	963	1285	933	1233	860	1145	840	1120
A/C 7	Batteria 1	405	575	870	1160	713	953	830	1108
	Batteria 2	330	445	1123	1495	1123	1495	750	1000
A/C 8	Batteria 1	250	325	1028	1370	663	885	683	913
	Batteria 2	330	445	1058	1410	765	1023	795	1060

Tabella 23 Dati batteria *2,5 FH

Si ottiene così la seguente tabella finale dove sono mostrati i guasti e le rimozioni effettuate durante l'intero arco temporale di osservazione:

		CUMULATIVO ORE BATTERIE							
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3		GRUPPO 4	
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	405	575	1698	2070	3183	3555	4290	4533
	Batteria 2	925	1233	2291	2643	3668	4011	4769	5021
A/C 2	Batteria 1	1008	1345	1750	1920	2250	2365	3235	3528
	Batteria 2	828	1103	2123	2461	3299	3579	4294	4534
A/C 3	Batteria 1	748	995	1095	1128	1988	2273	3213	3526
	Batteria 2	378	500	1625	2000	2770	3028	3861	4141
A/C 4	Batteria 1	405	575	1625	1975	2720	2970	3635	3855
	Batteria 2	298	400	778	900	2013	2385	3300	3603
A/C 5	Batteria 1	775	1035	1413	1535	2573	2923	3586	3808
	Batteria 2	405	575	1558	1888	3011	3383	4196	4463
A/C 6	Batteria 1	405	575	1648	2005	3130	3505	4235	4480
	Batteria 2	963	1285	2218	2518	3378	3663	4503	4783
A/C 7	Batteria 1	405	575	1445	1735	2448	2688	3518	3796
	Batteria 2	330	445	1568	1940	3063	3435	4185	4435
A/C 8	Batteria 1	250	325	1353	1695	2358	2580	3263	3493
	Batteria 2	330	445	1503	1855	2620	2878	3673	3938

Tabella 24 Cumulativo ore batterie

Le caselle in verde sono state ottenute utilizzando lo strumento formattazione condizionale, impostando come valore di target le ore di volo cumulative per velivolo. Ciò sta a significare che le zone in verde rappresentano warning e rimozioni che si verificheranno in momenti al di fuori del periodo di osservazione dell'analisi.

Fleet 2

Sono riportati i dati e i risultati con le stesse modalità seguite per la Flotta 1.

		Cumulativo ore di volo									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
AC2-1		0	141	291	472	697	861	1037	1206	1325	1459
AC2-2		0	115	265	381	632	894	1085	1275	1455	1672
AC2-3		0	69	325	701	1027	1203	1422	1641	1768	1922
AC2-4		0	40	275	493	782	966	1198	1497	1605	1605
AC2-5		0	0	51	170	344	732	1037	1448	1943	2138
AC2-6		0	0	0	56	442	634	1104	1104	1382	1822

		DATI BATTERIE									
		GRUPPO 1			GRUPPO 2			GRUPPO 3			
		degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione	
A/C 1	Batteria 1	0,7	86	114	0,0134	445	599	0,0211	284	378	
	Batteria 2	0,0201	294	400	0,0215	279	373	0,0221	272	363	
A/C 2	Batteria 1	0,06	106	130	0,045	132	178	0,0204	294	391	
	Batteria 2	0,0142	423	561	0,0198	302	404	0,0221	271	361	
A/C 3	Batteria 1	0,0211	284	378	0,0152	390	526	0,0193	310	414	
	Batteria 2	0,05	119	160	0,014	430	573	0,014	429	572	
A/C 4	Batteria 1	0,0142	420	557	0,15	40	51	0,014	430	573	
	Batteria 2	0,05	119	160	0,0146	409	547	0,0158	378	507	
A/C 5	Batteria 1	0,045	132	178	0,05	119	160	0,0144	413	555	
	Batteria 2	0,0172	350	464	0,02	300	400	0,0226	266	354	
A/C 6	Batteria 1	0,0222	271	362	0,0133	451	599	0,0226	265	353	
	Batteria 2	0,1	59	80	0,7	86	114	0,0144	413	555	

		DATI BATTERIE*2,5 FH							
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3			
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione		
A/C 1	Batteria 1	215	285	1113	1498	710	945		
	Batteria 2	735	1000	698	933	680	908		
A/C 2	Batteria 1	265	325	330	445	735	978		
	Batteria 2	1058	1403	755	1010	678	903		
A/C 3	Batteria 1	710	945	975	1315	775	1035		
	Batteria 2	298	400	1075	1433	1073	1430		
A/C 4	Batteria 1	1050	1393	100	128	1075	1433		
	Batteria 2	298	400	1023	1368	945	1268		
A/C 5	Batteria 1	330	445	298	400	1033	1388		
	Batteria 2	875	1160	750	1000	665	885		
A/C 6	Batteria 1	678	905	1128	1498	663	883		
	Batteria 2	148	200	215	285	1033	1388		

		CUMULATIVO ORE BATTERIA					
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3	
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	215	285	1398	1783	2493	2728
	Batteria 2	735	1000	1698	1933	2613	2841
A/C 2	Batteria 1	265	325	655	770	1505	1748
	Batteria 2	1058	1403	2158	2413	3091	3316
A/C 3	Batteria 1	710	945	1920	2260	3035	3295
	Batteria 2	298	400	1475	1833	2906	3263
A/C 4	Batteria 1	1050	1393	1493	1521	2596	2954
	Batteria 2	298	400	1423	1768	2713	3036
A/C 5	Batteria 1	330	445	743	845	1878	2233
	Batteria 2	875	1160	1910	2160	2825	3045
A/C 6	Batteria 1	678	905	2033	2403	3066	3286
	Batteria 2	148	200	415	485	1518	1873

Tabella 25 Dati flotta 2

Fleet 3

Sono riportati i dati e i risultati con le stesse modalità seguite per la Flotta 1.

	CUMULATIVO ORE DI VOLO									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
A/C 1	0	0	53	230	330	440	705	1164	1376	1639
A/C 2	0	0	19	157	358	584	931	1377	1711	1995
A/C 3	0	0	0	100	340	620	903	987	1293	1607
A/C 4	0	0	0	0	144	534	534	804	1262	1601

		DATI BATTERIE								
		GRUPPO 1			GRUPPO 2			GRUPPO 3		
		degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione	degrado	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	0,06	106	130	0,0139	432	575	0,0221	265	356
	Batteria 2	0,022	271	362	0,0157	379	501	0,0179	337	450
A/C 2	Batteria 1	0,045	132	178	0,06	106	123	0,0157	379	501
	Batteria 2	0,0152	390	526	0,0133	451	601	0,022	271	362
A/C 3	Batteria 1	0,7	86	114	0,0139	424	571	0,0199	301	400
	Batteria 2	0,0142	423	561	0,021	286	383	0,0172	348	465
A/C 4	Batteria 1	0,0162	370	493	0,0172	348	465	0,0181	331	441
	Batteria 2	0,045	132	178	0,15	40	51	0,0188	315	424

		DATI BATTERIE*2,5 FH					
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3	
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	265	325	1080	1438	663	890
	Batteria 2	678	905	948	1253	843	1125
A/C 2	Batteria 1	330	445	265	308	948	1253
	Batteria 2	975	1315	1128	1503	678	905
A/C 3	Batteria 1	215	285	1060	1428	753	1000
	Batteria 2	1058	1403	715	958	870	1163
A/C 4	Batteria 1	925	1233	870	1163	828	1103
	Batteria 2	330	445	100	128	788	1060

		CUMULATIVO ORE BATTERIE					
		GRUPPO 1		GRUPPO 2		GRUPPO 3	
		avviso	rimozione	avviso	rimozione	avviso	rimozione
A/C 1	Batteria 1	265	325	1405	1763	2426	2653
	Batteria 2	678	905	1853	2158	3001	3283
A/C 2	Batteria 1	330	445	710	753	1701	2006
	Batteria 2	975	1315	2443	2818	3496	3723
A/C 3	Batteria 1	215	285	1345	1713	2466	2713
	Batteria 2	1058	1403	2118	2361	3231	3524
A/C 4	Batteria 1	925	1233	2103	2396	3224	3499
	Batteria 2	330	445	545	573	1361	1633

Tabella 26 Dati flotta 3

Avendo ottenuto dunque tali tabelle, è stato possibile simulare il completo scenario per ogni singola flotta tramite l'ausilio del modello. Per semplicità grafica sono riportati i plot ottenuti per la Flotta 3 derivanti dalla simulazione e inoltre non sono state riportate le curve delle batterie che presentano warnings o rimozioni al di fuori del periodo di osservazione dello scenario (celle in verde delle precedenti tabelle).

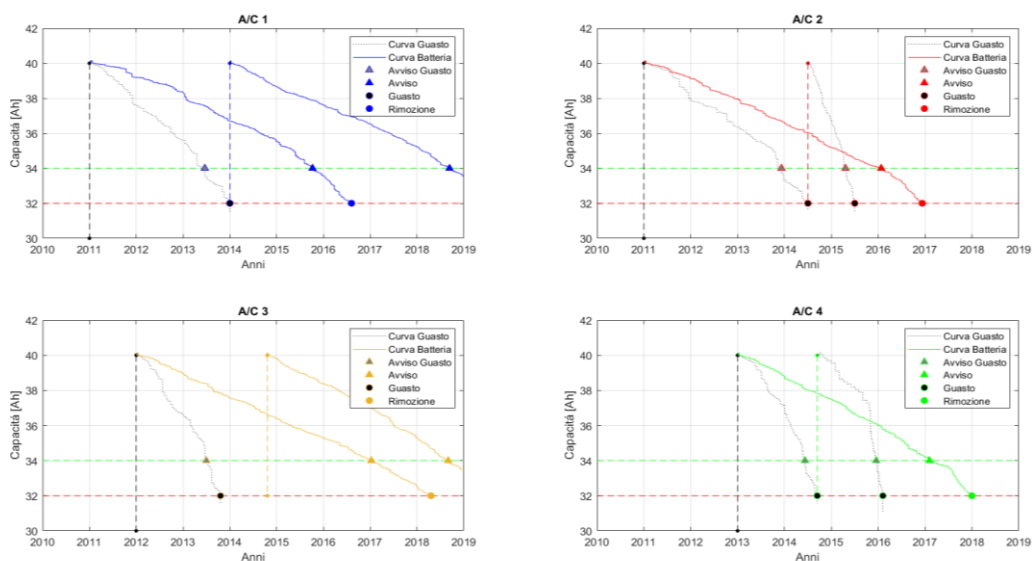


Figura 42 Grafici simulazione Flotta 3 per singolo velivolo

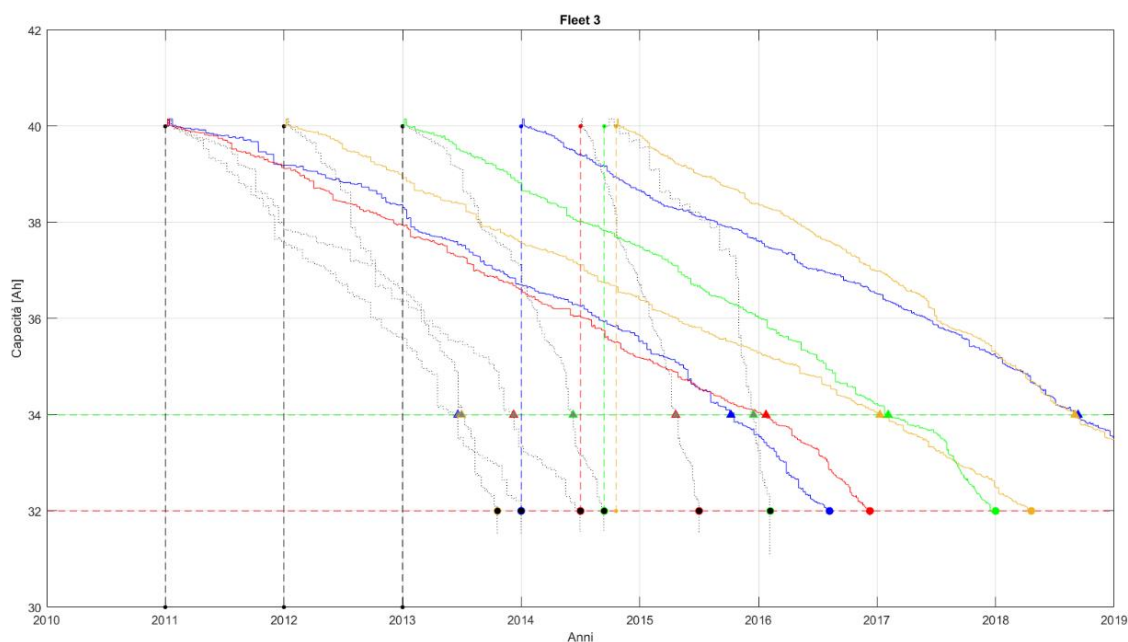
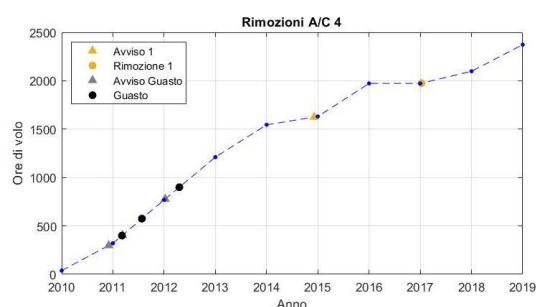
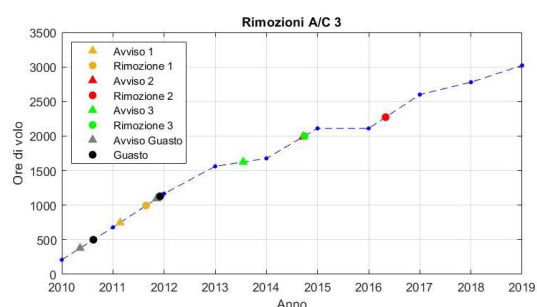
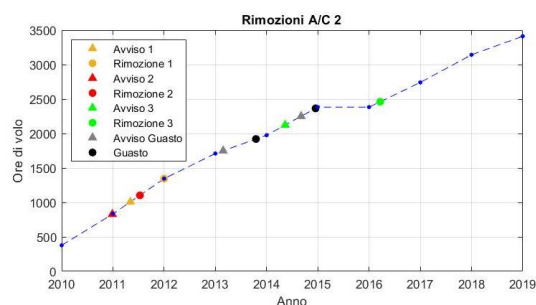
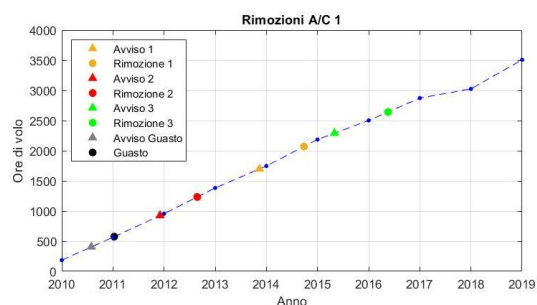


Figura 43 Grafico simulazione intera Flotta 3

In definitiva utilizzando la stessa procedura per le altre flotte, si sono ottenuti i seguenti grafici, che mostrano i punti di avviso e rimozione delle batterie guaste e/o a fine vita per ogni singolo velivolo delle flotte considerate durante l'intero volato:

Flotta 1



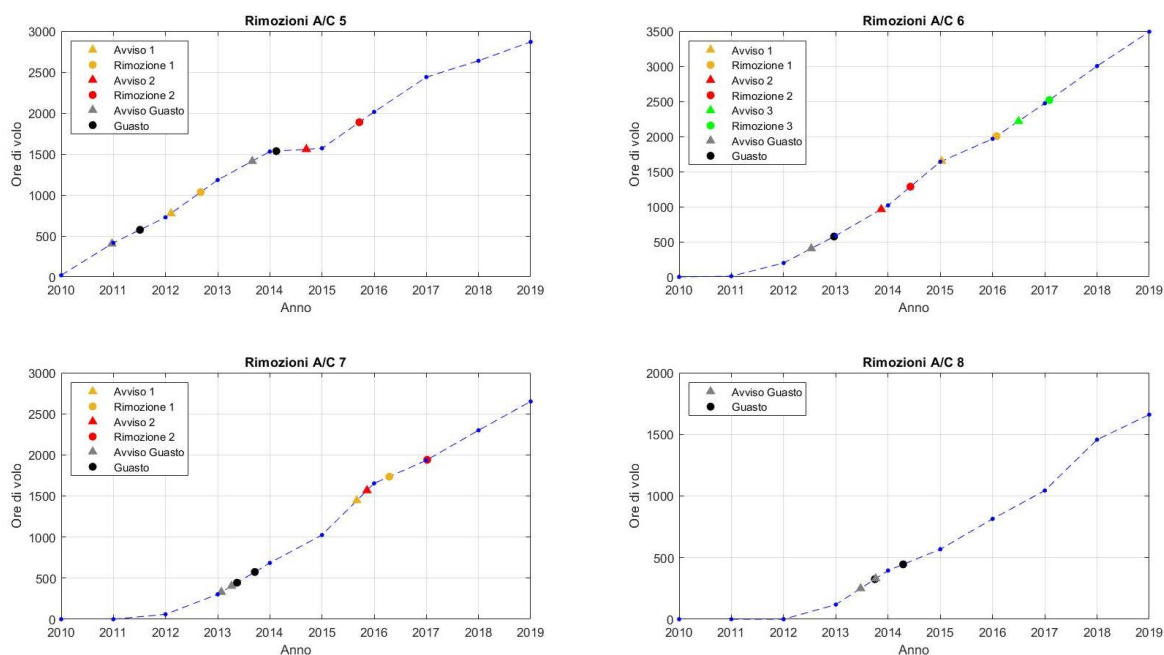


Figura 44 Grafici rimozioni Flotta 1

Flotta 2

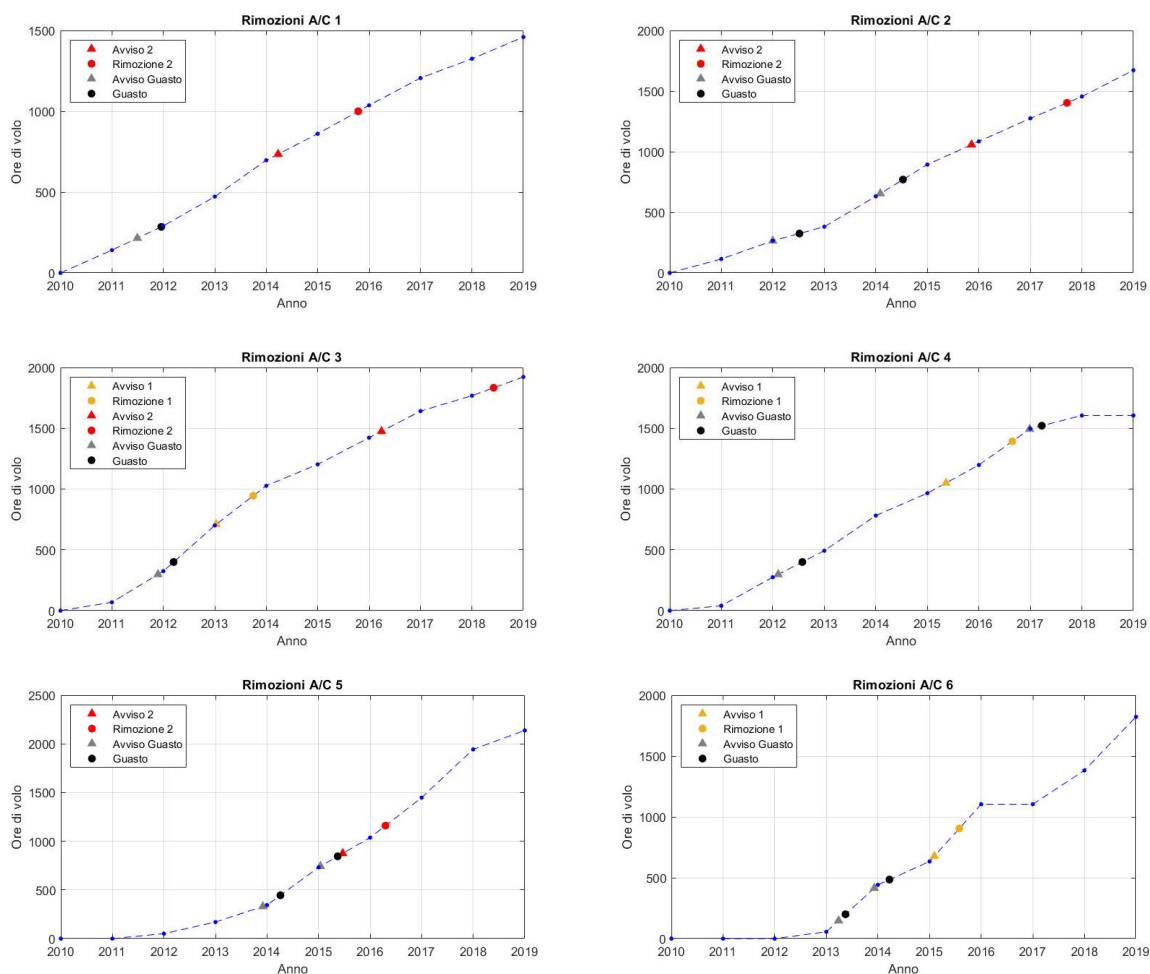


Figura 45 Grafici rimozioni Flotta 2

Flotta 3

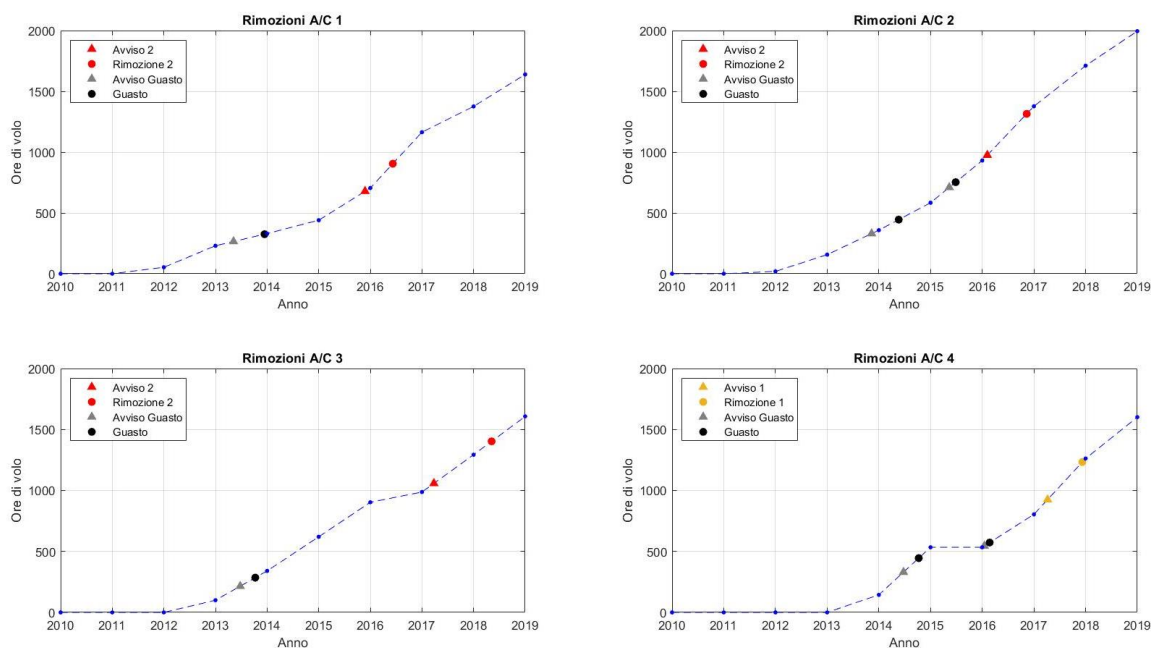


Figura 46 Grafici rimozioni Flotta 3

In tabella sono riportati i risultati riassuntivi di tali simulazioni:

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
FLEET1	Guasti	1	4	2	5	2	1	0	0	0	0
	Rimozioni	0	2	3	0	3	1	6	3	0	0
FLEET2	Guasti	0	0	4	1	3	1	0	1	0	0
	Rimozioni	0	0	0	1	0	2	2	1	1	0
FLEET3	Guasti	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0
	Rimozioni	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0

Tabella 27 Risultati Simulazioni

Si evidenzia dunque che le rimozioni totali sono dello stesso numero rispetto al caso reale. È possibile effettuare le seguenti osservazioni:

- Avendo un sistema in grado di conoscere la capacità della batteria nel tempo, e più in generale lo stato di vita di tale batteria, non sono necessari overhaul schedati a cadenza annuale.
- Anche nel caso di imminente guasto il sistema riesce a riconoscere la possibile avaria, e tramite un segnale di warning è possibile attivare in anticipo le misure correttive che possono consistere nell'approvvigionamento di nuovi ricambi e dunque nella sostituzione/riparazione della parte guasta.

I discard sono stati calcolati seguendo lo stesso procedimento adottato nel caso Reale:

	DISCARD									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Fleet 2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Fleet 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabella 28 Discard (Scenario Innovativo)

9.4 Analisi costi Manutenzione

Dall'analisi dei grafici soprariportati sono state calcolate per differenza tra segnale di avviso e rimozione, le RUL (esprese in mesi per semplicità) per ogni singola batteria di ogni velivolo:

		RUL [mesi]				
		batteria 1	batteria 2	batteria 3	batteria 4	batteria 5
FLEET 1	A/C 1	6	7	8	9	0
	A/C 2	6	6	6	2	18
	A/C 3	2	6	1	7	16
	A/C 4	3	4	2	13	0
	A/C 5	5	6	4	11	0
	A/C 6	5	6	12	7	0
	A/C 7	3	4	6	13	0
	A/C 8	3	4	0	0	0
FLEET 2	A/C 1	6	18	0	0	0
	A/C 2	5	5	18	0	0
	A/C 3	4	8	24	0	0
	A/C 4	5	14	2	0	0
	A/C 5	3	3	6	0	0
	A/C 6	1	2	9	0	0
FLEET 3	A/C 1	6	6	0	0	0
	A/C 2	5	2	8	0	0
	A/C 3	3	10	0	0	0
	A/C 4	4	1	7	0	0

Tabella 29 RUL (Scenario Innovativo)

È necessaria un'osservazione: un limitato numero di valori di RUL è molto elevato per alcuni velivoli. Ciò è dovuto al fatto che questi velivoli non sono stati operativi, si ipotizza per esigenze del Cliente, in alcuni degli anni in cui l'analisi è stata effettuata.

Approvvigionamento Primo anno

Per quanto riguarda l'approvvigionamento iniziale si è adottato il seguente criterio: essendo la manutenzione predittiva un processo del tutto innovativo, e non avendo nessun dato storico di riferimento, si suppone un'initial provisioning, predisponendo e quindi acquistando in totale un numero di batterie corrispondenti al 15% delle batterie complessivamente montate sulla flotta.

- Flotta 1: 3 batterie di scorta iniziale;
- Flotta 2: 2 batterie di scorta iniziale;
- Flotta 3: 1 batteria di scorta iniziale.

Approvvigionamento Secondo anno

Per l'approvvigionamento a partire dal secondo anno in poi, facendo riferimento ai valori di RUL riportati nella tabella soprascritta di ogni batteria, si è utilizzato il seguente algoritmo per la stima del bisogno di batterie da acquistare:

$$\begin{cases} \text{se } \frac{TAT}{RUL} > 1 \text{ Bisogno} = 1 \\ \text{se } \frac{TAT}{RUL} < 1 \text{ Bisogno} = 0 \end{cases}$$

Dopo aver calcolato il bisogno totale dell'intera flotta si utilizza la seguente relazione per il calcolo del delta: $\Delta = Scorte - Bisogno$

In tabella sono illustrati risultati eseguendo l'algoritmo:

		BISOGNO BATTERIE									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
FLEET 1	A/C 1										
	A/C 2				1	1					
	A/C 3	1	1								
	A/C 4	1	1	1							
	A/C 5		1		1						
	A/C 6			1							
	A/C 7				2						
	A/C 8				2						
Totale		2	3	2	6	1	0	0	0	0	0
FLEET 2	A/C 1		1								
	A/C 2			1		1					
	A/C 3		1								
	A/C 4			1				1			
	A/C 5				1		1				
	A/C 6				2						
Totale		0	2	2	3	1	1	1	0	0	0
FLEET 3	A/C 1				0		0				
	A/C 2				1		1	0			
	A/C 3				1				0		
	A/C 4					1		1	0		
totale		0	0	0	2	1	1	1	0	0	0

Tabella 30 Bisogno batterie

Si passa dunque al calcolo dei delta e delle scorte da acquistare e reintegrare per singola flotta:

		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
FLEET 1	Delta	1	0	1	-3	5	0	0	0	0	6
	Scorte	3	3	3	6	6	6	6	6	6	
	Acquistare				3						
	Reintegrare		1		1						
	Acq+Rei	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0
FLEET 2	Delta	0	0	0	-1	2	2	2			
	Scorte	0	2	2	2	3	3	3			
	Acquistare				1						
	Reintegrare			1		1					
	Acq+Rei	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
FLEET 3	Delta			1	-1	0	1	1	0	0	0
	Scorte			1	1	2	2	2	2	2	2
	Acquistare				1						
	Reintegrare										
	Acq+Rei	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tabella 31 Spare Parts (Scenario Innovativo)

Si procede all'analisi costi utilizzando gli stessi procedimenti dello scenario reale:

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Costo Spare	8000	8112	8226	8341	8457	8576	8696	8818	8941	9066	TOT
Fleet 1	0	8112	0	33363	0	0	0	0	0	0	41475
Fleet 2	0	0	8226	8341	0	0	0	0	0	0	16566
Fleet 3	0	0	0	8341	0	0	0	0	0	0	8341

Tabella 32 Costi Spare Parts (Scenario Innovativo)

		CUMULATIVE REPAIR COSTS									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Repair Cost		1500	1521	1542	1564	1586	1608	1630	1653	1676	1700
Fleet 1	Guasti	1500	4563	3084	6256	3172	1608	0	0	0	0
		1500	6063	9147	15403	18575	20183	20183	20183	20183	20183
	Rimozioni	0	3042	4626	0	4758	1608	9780	4959	0	0
		0	3042	7668	7668	12426	14034	23814	28773	28773	28773
	Totale Cum.	1500	9105	16815	23071	31001	34217	43997	48956	48956	48956
Fleet 2	Guasti	0	0	4626	1564	3172	1608	0	1653	0	0
		0	0	4626	6190	9362	10970	10970	12623	12623	12623
	Rimozioni	0	0	0	1564	0	3216	3260	1653	1676	0
		0	0	0	1564	1564	4780	8040	9693	11369	11369
	Totale Cum.	0	0	4626	7754	10926	15750	19010	22316	23992	23992
Fleet 3	Guasti	0	0	0	3128	3172	1608	1630	0	0	0
		0	0	0	3128	6300	7908	9538	9538	9538	9538
	Rimozioni	0	0	0	0	0	0	3260	1653	1676	0
		0	0	0	0	0	0	3260	4913	6589	6589
	Totale Cum.	0	0	0	3128	6300	7908	12798	14451	16127	16127

Tabella 33 Cumulative Repair costs

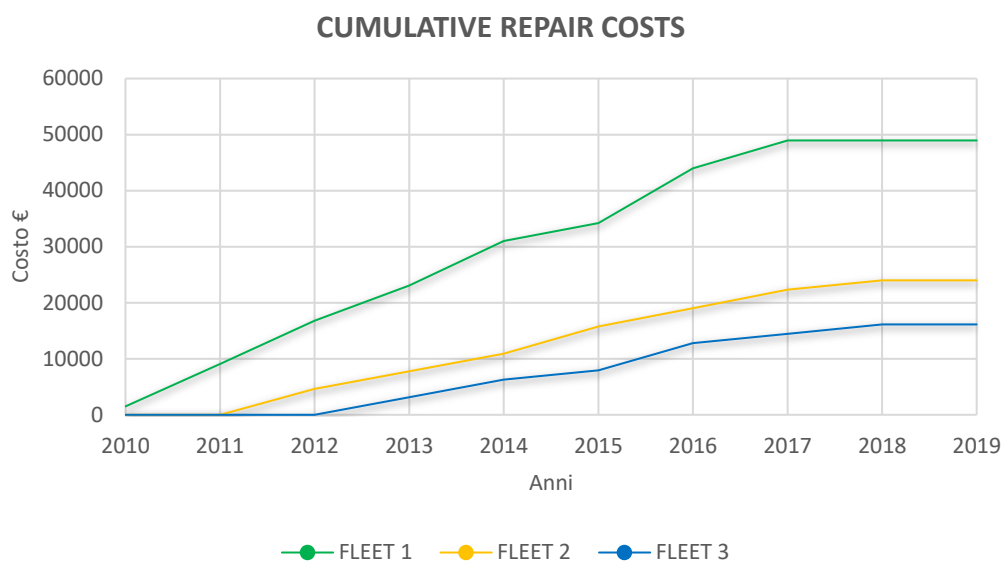


Figura 47 Cumulative Repair costs

I costi, per le attività di riparazione, sono stati calcolati con la seguente formula:

CostoRemoval/Installation

$$= \sum_{\substack{\#AC \text{ per Flotta} \\ 1}}^{\#AC \text{ per Flotta}} \text{Costo orario} * \text{Guasti} * \left(\text{tempo} \frac{\text{inst}}{\text{rim}} + \text{test} \right) / 60$$

$$+ \sum_{\substack{\#AC \text{ per Flotta} \\ 1}}^{\#AC \text{ per Flotta}} \text{Costo orario} * \text{Rimozione} * \left(\text{tempo} \frac{\text{inst}}{\text{rim}} + \text{test} \right) / 60$$

		CUMULATIVE REMOVAL/INSTALLATION COSTS									
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Fleet 1	Guasti	70	280	140	350	140	70	0	0	0	0
		70	350	490	840	980	1050	1050	1050	1050	1050
	Rimozioni	0	140	210	0	210	70	420	210	0	0
		0	140	350	350	560	630	1050	1260	1260	1260
	Totale Cum.	70	490	840	1190	1540	1680	2100	2310	2310	2310
Fleet 2	Guasti	0	0	280	70	210	70	0	70	0	0
		0	0	280	350	560	630	630	700	700	700
	Rimozioni	0	0	0	70	0	140	140	70	70	0
		0	0	0	70	70	210	350	420	490	490
	Totale Cum.	0	0	280	420	630	840	980	1120	1190	1190
Fleet 3	Guasti	0	0	0	140	140	70	70	0	0	0
		0	0	0	140	280	350	420	420	420	420
	Rimozioni	0	0	0	0	0	0	140	70	70	0
		0	0	0	0	0	0	140	210	280	280
	Totale Cum.	0	0	0	140	280	350	560	630	700	700

Tabella 34 Cumulative removal/installation costs

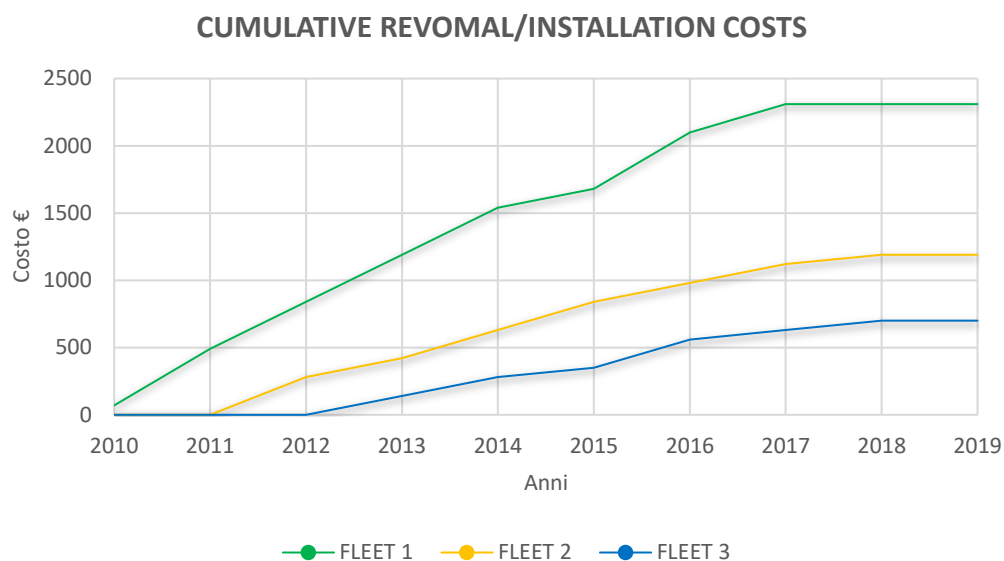


Figura 48 Cumulative removal/installation costs

In definitiva possono essere calcolati i valori di CPFH per lo scenario innovativo:

	CPFH			
	SPARE	REPAIR	PERSONELL	TOT
Fleet 1	1,8	2,13	0,1	4,03
Fleet 2	1,56	2,26	0,11	3,93
Fleet 3	1,22	2,36	0,1	3,68

Tabella 35 CPFH (Scenario Innovativo)

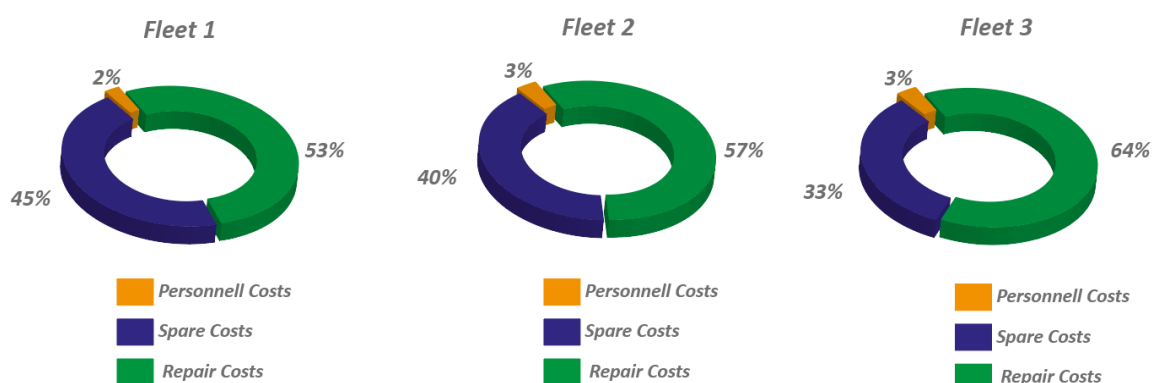


Figura 49 Costi totali (Scenario Innovativo)

A differenza del Caso Reale, adesso i costi sono ovviamente distribuiti maggiormente tra costi di approvvigionamento delle Spare Parts e costi di Riparazione. Sembrerebbe quindi che semplicemente vi sia stata una traslazione tra le tipologie di costi senza alcun particolare vantaggio. In realtà, come sarà più dettagliatamente evidenziato nel paragrafo successivo, confrontando le singole voci di costo e i valori di CPFH ottenuti, si ottiene un significativo risparmio grazie all'adozione di Manutenzione Predittiva, rispetto al Caso Reale.

10 CONCLUSIONI

Da una semplice analisi dei grafici riportati nelle *Figure 41 e 49*, in cui sono mostrati i costi totali per singola flotta, è chiaro come l'utilizzo della manutenzione predittiva porti con sé enormi vantaggi. Oltre alla mancanza dei costi di Overhaul, si nota come in particolare i costi per le Spare Parts siano enormemente ridotti, mentre si ha un aumento dei costi dovuti alla rimozione-installazione delle parti. Nelle figure sottostanti sono riportati più dettagliatamente i confronti tra i costi delle singole sezioni di calcolo per le diverse metodologie di manutenzione:

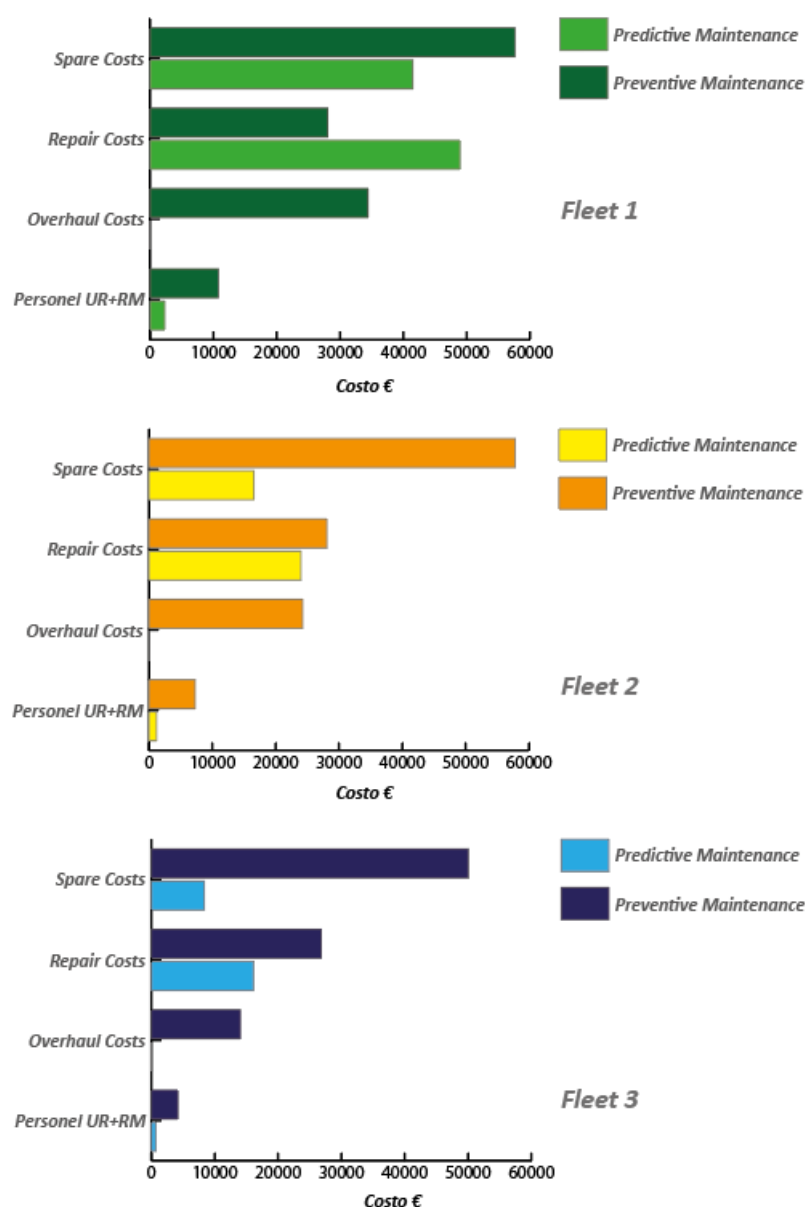


Figura 50 Confronto costi singola sezione (Predictive vs Preventive)

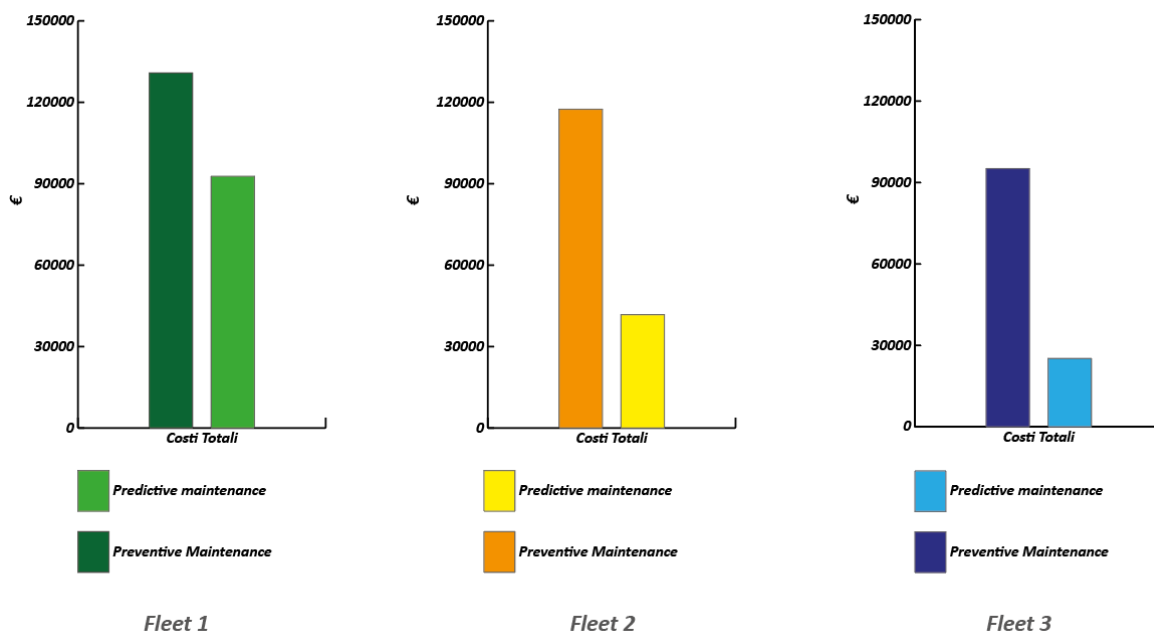


Figura 51 Confronto costi totali (Predictive vs Preventive)

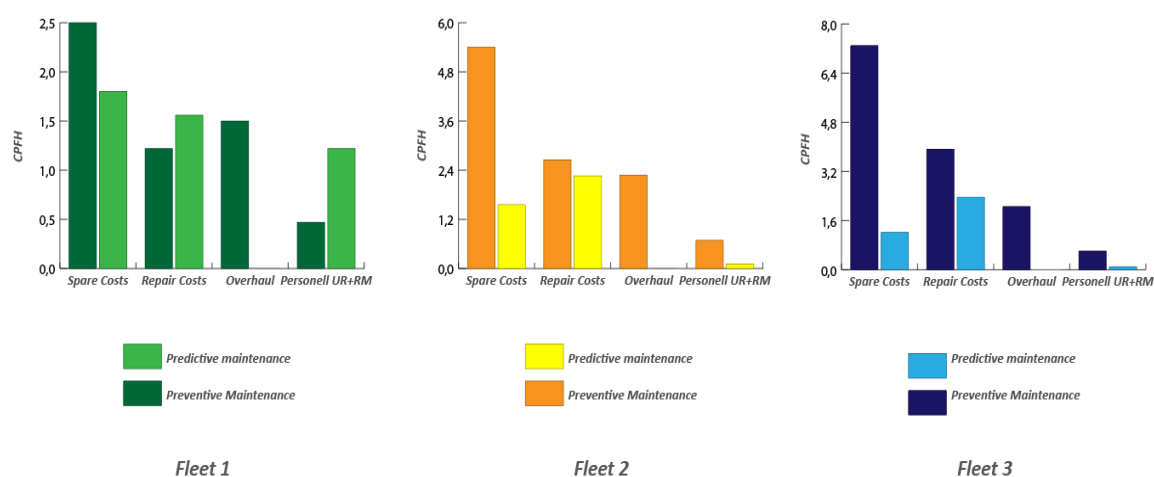


Figura 52 Confronto CPFH (Predictive vs Preventive)

Dall'osservazione attenta dei grafici a barre si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Per ogni flotta, gli Spare Cost sono minori dei Repair Costs ottenuti tramite l'utilizzo della manutenzione predittiva, al contrario di quanto accade con la manutenzione preventiva. Tale divario potrà essere in futuro colmato grazie all'utilizzo di batterie più prestanti, e con una vita media maggiore su velivoli di nuova generazione, come ad esempio le Li-Ion.
- La Flotta 1, che ha un elevato numero di velivoli e FH nel tempo, si assesta ad un basso valore di CPFH, perché riesce ad ammortizzare maggiormente con il volo, e quindi l'effettivo utilizzo della macchina, i costi di manutenzione. Comunque sia come si nota dalla figura 51 si ottiene un risparmio notevole in termini di costi totali di manutenzione per l'intera flotta durante gli anni di servizio.
- Le Flotte 2 e 3, con meno velivoli e meno volo hanno un impatto maggiore nel risparmio a cui assistono in termini di CPFH, che ovviamente sarà in parte bilanciato

dall'investimento iniziale in un sistema di **Aircraft Health Management System** (AHMS), di minor impatto su una flotta di grandi dimensioni.

- Come si può facilmente osservare dalla *Figura 51*, la somma dei costi di ogni sezione di calcolo ottenuti con la **Predictive Maintenance** sono sempre minori rispetto alla spesa conseguita con la **Preventive Maintenance**.

È opportuno ricordare che tale studio è stato effettuato tramite un semplice modello che cerca di descrivere quanto più realisticamente possibile il comportamento di una batteria. Sicuramente in futuro tramite l'utilizzo di modelli più sofisticati, a fronte di una spesa maggiore iniziale in fase di progettazione, si otterranno elevati risparmi di costi e tempi di manutenzione in fase di supporto.

Tuttavia possiamo dire che per lo specifico Use Case, il passaggio a manutenzione predittiva consente di ottenere dei vantaggi e dei risparmi sul costo totale. Dall'altra parte, se si ipotizzasse un impatto simile anche su altri equipaggiamenti del costo delle riparazioni, e comunque in generale se ci fosse un numero elevato di guasti, si potrebbe pensare di intervenire con maggiore precisione con l'analisi FRACAS per capire le cause delle rimozioni e le possibili azioni correttive volte al miglioramento delle performance affidabilistiche.

Tutto questo può essere possibile un domani con lo sviluppo e l'utilizzo di un sistema come l'**Aircraft Health Management System**. In figura è stato riportato un flow chart che descrive il funzionamento di tale sistema per il monitoraggio delle batterie, ma che può essere esteso a qualunque sistema:

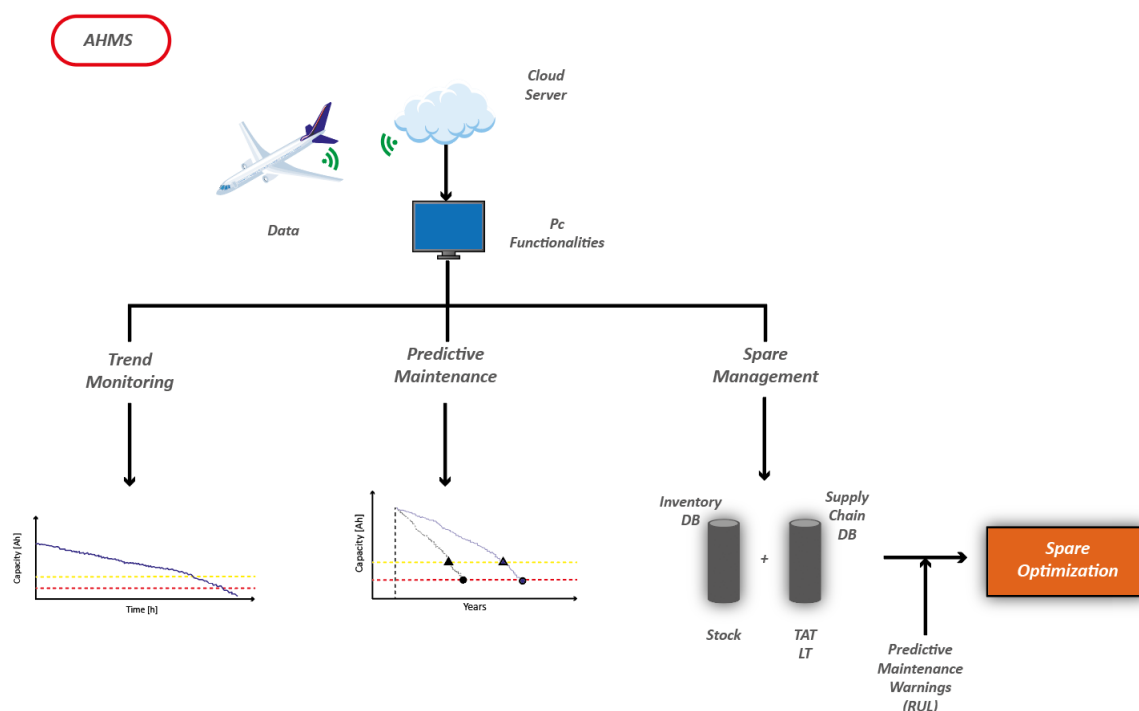


Figura 53 Flowchart AHMS

I dati processati all'interno del velivolo e le misurazioni effettuate dai sensori saranno scambiati tramite telemetria con un **Cloud Server**, nel quale vengono immagazzinati e processati ad un calcolatore che attua 3 differenti controlli:

- **Trend Monitoring**: monitoraggio in tempo reale delle prestazioni, utilizzabile da un operatore con competenze ingegneristiche al termine di ogni volo per verificare il comportamento degli equipaggiamenti;

- **Predictive Maintenance:** generazione warnings e stima della RUL, utilizzabile da un operatore con competenze di manutenzione per attivarsi in caso di richiesta di rimozione parte;
- **Spare Management:** gestione dello stock e della Supply Chain, utilizzabile da un operatore logistico, per determinare correttamente le effettive necessità del Cliente.

Tramite il funzionamento in contemporanea di tali processi è possibile ottenere un miglioramento della fase di approvvigionamento e monitoraggio/gestione della Supply Chain, e quindi, tramite l'ausilio dei dati ricavati e stimati dalla manutenzione predittiva, uno **Spare Optimization**.

Ovviamente un sistema di questo tipo implica diverse sfide da affrontare, prima fra tutte la progettazione e sviluppo di un'infrastruttura in grado di gestire Big Data e con caratteristiche di cybersicurezza all'avanguardia, visto anche la possibile applicazione in ambito militare.

Oltre a questo, per ogni singolo equipaggiamento sotto osservazione, devono essere previsti dei metodi automatici (Machine Learning ad esempio) o derivanti da modelli ingegneristici, che permettano di analizzare e prevedere il loro reale comportamento durante l'utilizzo. Devono essere inoltre stabilite delle soglie di allerta che avvisino ingegneri e manutentori di possibili failures.

Il tutto deve poi essere messo in comunicazione con un moderno sistema di tracciamento dei ricambi, che permetta all'operatore logistico di ridurre i costi legati alle incertezze dei modelli di approvvigionamento, come le scorte minime.

Tuttavia molte aziende del campo aeronautico si stanno ormai muovendo in questa direzione, anche in ambito militare, e use case come quello analizzato nel presente documento possono rappresentare un ulteriore contributo analitico alla lista di benefici che questi nuovi strumenti posso comportare.

11 BIBLIOGRAFIA

- Michel Broussely, Gianfranco Pistoia - **"INDUSTRIAL APPLICATIONS OF BATTERIES FROM CARS TO AEROSPACE AND ENERGY STORAGE"**
- Ristic B. - **"BEYOND THE KALMAN FILTER. PARTICLE FILTERS FOR TRACKING APPLICATIONS"**
- Zimmerman, Albert H. - **"NICKEL-HYDROGEN BATTERIES PRINCIPLES AND PRACTICE"**
- Kai Goebel, Bhaskar Saha, Abhinav Saxena, Jose R. Celaya, and Jon P. Christophersen- **"PROGNOSTIC IN BATTERY HEALTH MANAGEMENT"**
- Sole Society of Logistics Engineers - **"2° CORSO BASE SU SUPPORTO LOGISTICO INTEGRATO"**
- Nikhil M. Vichare and Michael G. Pecht - **"PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT OF ELECTRONICS"**
- Paul D. Tomlison - **"EQUIPMENT MANAGEMENT KEY TO EQUIPMENT RELIABILITY AND PRODUCTIVITY IN MINING"**
- **ASD S3000L – International procedure specification for Logistic Support Analysis**
- Massimo Bonci, Gianni Bettino, Mirco Bartoli, Antonio Ghezzi - **"MANUTENZIONE PREDITTIVA: DOVE, QUALE, QUANTA? METODI E STRUMENTI PER L'INTRODUZIONE EFFICACE IN UN'INDUSTRIA DI PROCESSO: IL CASO TERREAL ITALIA"**
- George D. Hadden, Peter Bergstrom, Tariq Samad, Bonnie Holte Bennett, George J. Vachtsevanos and Joe Van Dyke - **"APPLICATION CHALLENGES: SYSTEM HEALTH MANAGEMENT FOR COMPLEX SYSTEM – PROJECT FOCUSING ON CONDITION BASED MAINTENANCE (CBM) FOR NAVAL SHIPS"**
- Mathworks **"NONLINEAR STATE ESTIMATION OF A DEGRADATION BATTERY SYSTEM"**, www.mathworks.com